
BACHELORARBEIT

Herr
Xiaohu Wang

**Konstruktion eines
Funktionsmodells eines
Heißgasmotors nach den Stirling-
Prinzip mit Arbeits- und
Verdrängerkolben in V-Anordnung
und elektrischer Auskoppelung der
erzeugten Leistung**

Mittweida, 2011

BACHELORARBEIT

Konstruktion eines Funktionsmodells eines Heißgasmotors nach den Stirling- Prinzip mit Arbeits- und Verdrängerkolben in V-Anordnung und elektrischer Auskoppelung der erzeugten Leistung

Autor:

Herr Xiaohu Wang

Studiengang:

Maschinenbau

Seminargruppe:

MB07w1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. W. Reglich

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. U. Mahn

Einreichung:

Mittweida, 14.07.2011

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2011

Bibliografische Beschreibung:

Xiaohu, Wang:

Konstruktion eines Funktionsmodells eines Heißgasmotors nach den Stirling-Prinzip mit Arbeits- und Verdrängerkolben in V-Anordnung und elektrischer Auskoppelung der erzeugten Leistung.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2011

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Konstruktion eines Funktionsmodelles eines Stirlingmotors mit Arbeits- und Verdrängerkolben in V-Anordnung und elektrischer Auskoppelung der erzeugten Leistung von 500 Watt. Die Modellierung des Motors erfolgt mit der 3D-Software Solid-Works. Die wichtige Kriterien sind die Gestaltung von Brenner, Kühlung und Regenerator .

Inhalt

Inhalt.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Kapitelübersicht.....	4
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1 Theoretische Grundlagen.....	5
2.1.1 Die Gasgesetze.....	5
2.1.2 Das Modell des idealen Gases.....	5
2.1.3 Der Druck eines Gases.....	6
2.1.4 Die absolute Temperatur und Zustandsgleichung....	7
2.2 Die Hauptsätze der Wärmelehre.....	9
2.2.1 Die innere Energie.....	9
2.2.2 Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre.....	10
2.2.3 Die spezifische Wärme.....	10
2.2.4 Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre.....	12
2.3 Wärmekraftmaschinen.....	12

2.3.1	Umwandlung von Wärme und Arbeit.....	12
3	Funktion des Stirlingmotors.....	14
3.1	Grundlagen.....	14
3.2	Funktionsprinzip des Stirlingmotors.....	15
4	Berechnungen für die Hauptteile des Stirlingmotors.....	23
4.1	Berechnungen nach Werdich und Kübler.....	23
4.2	Verbesserte Berechnungen und Diskussion.....	33
4.3	Berechnungen nach Beale.....	39
5	Konstruktion des Stirlingmotors.....	44
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	70
6.1	Zusammenfassung.....	70
6.2	Ausblick.....	71
	Literatur.....	73
	Selbstständigkeitserklärung.....	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Rev'd Dr. Robert Stirling (1790-1878).....	1
Abbildung 1-2: Stirlingmotor von Robert Stirling.....	2
Abbildung 2-1: isobare Zustandsänderung.....	11
Abbildung 2-2: isochore Zustandsänderung.....	11
Abbildung 2-3: Zylinder mit Kolben.....	12
Abbildung 2-4: pV-Diagramm.....	13
Abbildung 3-1: Alphatype-Stirlingmotor.....	15
Abbildung 3-2: Betatype-Stirlingmotor.....	15
Abbildung 3-3: Das p-V-Diagramm.....	17
Abbildung 3-4: 1. Takt des Alphatype-Stirlingmotors.....	17
Abbildung 3-5: 2. Takt des Alphatype-Stirlingmotors.....	19
Abbildung 3-6: 3. Takt des Alphatype-Stirlingmotors:.....	20
Abbildung 3-7: 4. Takt des Alphatype-Stirlingmotors.....	22
Abbildung 4-1: Abhängigkeit des Carnot-Wirkungsgrad.....	24
Abbildung 4-2: das p-V Diagramm des Stirlingmotors.....	26
Abbildung 5-1: 3D Modell des Stirlingmotors.....	44
Abbildung 5-2: Gehäuse des Stirlingmotors.....	45
Abbildung 5-3: Kolben und Zylinder.....	46
Abbildung 5-4: Kurbelwelle.....	46
Abbildung 5-5: Kühlung des Stirlingmotors.....	48

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Eigenschaften von vergleichenden Gasen.....	35
Tab. 2: Vergleichen der Hubvolumen der einzelnen Berechnungen.....	43
Tab. 3: Vergleichen von Kolbendurchmesser Dund Hub bei verschiedenen Fällen.....	43

Abkürzungsverzeichnis

Vgl.....Vergleich

k.....Boltzmann Konstante

ΔQdie thermische Energie

m.....die Masse der Substanz

C.....die spezifische Wärmekapazität

ΔTdie Änderung der Temperatur

ηCarnot-Wirkungsgrad

T_oobere Temperatur

T_hhöchste Temperatur

T_uuntere Temperatur

T_nniedrigste Temperatur

Q.....zugeführte Wärme

c_vspezifische Wärme

ρ Dichte der Substanz bei 0 °C und 1 bar

ΔT Temperaturunterschied beim Aufheizen

V_aAnfangsvolumen

W.....Arbeit in Js

m.....= $\rho \cdot V$ Masse der Luft in Kg

R.....Gaskonstante

T_eEndtemperatur

V_eEndvolumen in m^3

V_aAnfangsvolumen in m^3

Qzugeführte Wärme

tDauer des Wärmeüberganges

αWärmeübergangskoeffizient in W/m^2K

1. Einleitung

Im einleitenden Kapitel werden die Motivation und die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit besprochen. Gleichzeitig erfolgt ein kurzer Überblick zu den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit.

1.1 Motivation



".....These imperfections have been in great measure removed by time and especially by the genius of the distinguished Bessemer. If Bessemer iron or steel had been known thirty five or forty years ago there is scarce a doubt that the air engine would have been a great success...It remains for some skilled and ambitious mechanist in a future age to repeat it under favourable circumstances and with complete success...."—Brief von Rev. Stirling zu seinem Bruder James.

Abbildung 1-1: Dr. Robert Stirling
(1790-1878)

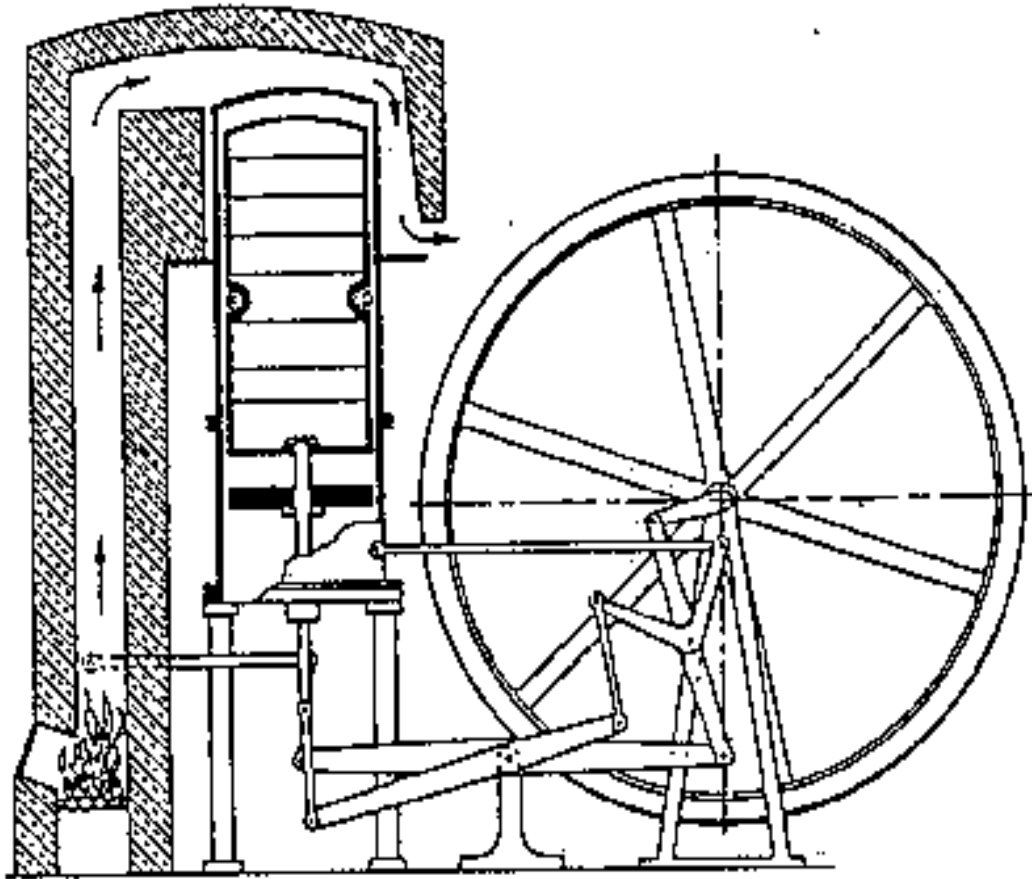


Abbildung 1-2: Stirlingmotor von Robert Stirling

Der Stirlingmotor, der auch Heißgasmotor genannt, ist eine Wärmekraftmaschine, die von dem schottischen Geistlichen Reverend Robert Stirling 1816 seinen Stirlingmotor erfunden wurde, als er gerade damals 26 Jahre alt war, und er hat so großen Hoffnungen für seinen Konzept gemacht. Es gab viele Opfer damals in seiner Gemeinde durch Kesselexplosionen zu beklagen. Er hat im Gegensatz zu Dampfmaschinen oder Dieselmotoren mit einem abgeschlossenen Arbeitsgas arbeitet, d.h. die das für beliebige Erhitzungsweise geeignet werden kann. Danach der Robert Stirling hat sein erste Stirlingmotor als auch ersten Stirlingmotor im Weltweit in Schottland eingesetzt. Aufgrund die Verwendung von Luft als Arbeitsgas, die die Explosionsgefahr viel geringer als bei einer Hochdruckdampfmaschine war. Es gibt aber damals ein große Problem, das Material, welchen den

Konstrukteuren damals zu verfügt wurden, war den hohen Anforderungen schlicht und einfach noch nicht gewachsen. Das heißt, wegen des damals minderwertigen Materials, das den hohen Drücken bzw. hohen Temperaturen nicht standhalten konnte, setzte sich die hohen Anforderungen nicht durch.

Wenn die nötigen Materialien damals in 1937 vorhanden waren, hätte die dänische Firma Philips die Weiterentwicklung der Stirlingmaschine gemacht. Ein Stirlingmotor kann auch mechanisch angetrieben und dann eine Temperaturdifferenz erzeugt werden, wodurch sehr tiefe Temperaturen erreicht werden können. Dieser Einsatz entspricht dem einer Wärmepumpe. Obwohl bis heute ist die häufigste Anwendung des Stirlingmotors.

Arbeiten heute über 100 Firmen, Universitäten und andere Forschungseinrichtungen an der Entwicklungen und Verbesserung der Stirlingmaschinen und deren Anwendungen weltweit. Aber, heute, obwohl knapp 200 Jahre später, können wir noch sagen, dass die Erwartung von Stirlingmotoren noch nicht gerecht werden können. Es gibt kaum jemand die Funktion eines Stirlingmotors erkennt oder nur jemand seine Funktionsweise von Stirlingmotor erklären kann.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Rahmen der Aufgabenstellung nach den Stirling-Prinzip zur Konstruktion von eines Funktionsmodells eines Heißgasmotors.

Das Hauptziel ist aber, dass die Funktionalitäten eines Funktionsmodells

Stirlingmotors mit den Arbeits- und Verdrängerkolben in V-Anordnung und elektrischer Auskoppelung der erzeugten Leistung von 500 Watt sein. Durchführung von Modellierung des Motors mit der 3D-Software Solid-Works und Gestaltung von Brenner, Kühlung und Regenerator müssen auch berücksichtigt werden.

1.3 Kapitelübersicht

Die Bachelorarbeit besteht aus sechs Kapiteln.

Nach der allgemeinen Einleitung des ersten Kapitels werden im Kapitel 2 die Grundlagen der Stirlingstechnologie und ihre Standards erläutert. Dieses Elementarwissen soll der gesamten Arbeit als Grundlage dienen.

Anschließend wird im Kapitel 3 für das Aufgabenverständnis der Stirlingmotor und seine Funktion erläutert.

Hinterher wird im Kapitel 4 die Berechnungen für die Konstruktion eines solchen Stirlingmotors vorgestellt. Dazu wird die Bemassungen von allen Hauptteilen des konstruierenden Stirlingmotors bestimmt.

Im Kapitel 5 wird die 3D-Zeichnungen mit Solidworks erfolges, und die Materialien von den Hauptteilen bestimmt.

Schließlich werden im Kapitel 6 die Resultate der einzelnen Kapitel der Bachelorarbeit noch einmal zusammengefasst. Zusätzlich wird ein Ausblick auf mögliche Weiterwicklungen gegeben.

2. Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Theoretische Grundlagen

Es bedarf zunächst der ganzen theoretischen Grundlagen um den Stirlingmotor zu verstehen. Im diesem Kapitel werden die hauptsächlichsten Dinge enthalten.

2.1.1 Die Gasgesetze

Die Kenntnis der Gasgesetze für den Konstruktion von Wärmekraftmaschinen sind unentbehrlich. Sie haben eine wichtige Basis für die technische Anwendung der Wärmelehre gebildet. Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Druck, der Temperatur und dem Volumen eines Gases, welche durch die Gasgesetze ausgedrückt werden lässt.

2.1.2 Das Modell des idealen Gases^[1]

Im Modell des idealen Gases werden alle Gasteilchen als ausdehnungslose Massepunkte angenommen, welche sich frei durch das ihnen zur Verfügung stehende Volumen bewegen können. Es gibt die Molekularkräfte im festen Körpern oder in Flüssigkeiten reicht, also die Kräfte zwischen den einzelnen Teilchen aus, um diese trotz ihrer thermischen Bewegung zueinander bilden. Wegen in Gasen ist dem nicht so, denn hier ist die Bewegungsenergie größer als die Bindungsenergie, dazu bewegen sich Gasmoleküle mit hoher Geschwindigkeit und füllen bei normalen

1. Vgl. Sexl – Raab – Streeruwitz (1990) Physik 2

Temperaturen jeden Behälter vollständig und gleichmäßig aus. Zusammenstöße mit anderen Teilchen sind sehr häufig. Wenn wir die Schwerkraft nun aus dem Spiel lassen, bewegen sich die einzelnen Teilchen also so lange geradlinig, bis sie auf ein Hindernis treffen, wie z.B. die Gefäßwand oder andere Teilchen.

Zusammengefasst bedeutet das: Unter einem idealen Gas versteht man ein Medium, dessen Teilchen im Vergleich zum mittleren Abstand eine verschwindend kleine Ausdehnung besitzen und nur durch elastische Stöße wechselwirken.

2.1.3 Der Druck eines Gases

Stellte sich ihr einen Behälter mit einem Gasteilchen vor, welches auf einer geraden Bahn mit hoher Geschwindigkeit durch den leeren Raum fliegt und auf ein Wand prallt, wiederum zurückfliegt und so nie zur Ruhe kommt.

Man wird einen würfelförmigen Behälter zur Berechnung des Druckes nimmt, in dem das Gas völlig regellos umherfliegt. Und die innere Energie des idealen Gases wird durch die kinetische Energie dieser Molekularbewegung gegeben. Zerlegt man die Geschwindigkeit jeden Teilchens in Komponenten, und die Richtung der Würfelkanten haben, so kann man sechs verschiedene Bewegungsrichtungen (vor, zurück, links, rechts, rauf, runter) bekommen können. Aufgrund kann man in der Berechnung die ungeordnete Bewegung der Moleküle durch in eine Bewegung ersetzen, bei der sich je ein Sechstel der Moleküle senkrecht auf eine der sechs Wandflächen des Würfels zubewegt.

Vor dem Stoß hat jedes Molekül der Masse m und den Impuls $+mv$, und nach

dem Stoß hat den Impuls $-mv$. Also ist die Impulsänderung $2mv$ beträgt.

Es gibt sich N Moleküle im Behälter befinden und hat der Behälter das Volumen V , so kann man die Anzahl der Moleküle im Kubikmeter bekommen (N/V).

Der Druck eines idealen Gases beträgt:

$$p = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{mv^2}{2}$$

Wobei unter $m v^2 / 2$ die mittlere kinetische Energie eines Moleküls zu verstehen ist.

In allgemeiner Form können wir den Gasdruck als Funktion des Volumens aus der von Bernoulli angestellten Rechnung gewinnen.

Bei konstanter Temperatur gilt:

$$p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \frac{mv^2}{2} = \text{konstant.}$$

Dies ist das Boyle-Mariotte'sche Gesetz. Es lautet:

$$p \cdot V = \text{konst.}$$

2.1.4 Die absolute Temperatur und die

Zustandsgleichung

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{mv^2}{2} \quad \text{und} \quad p = \frac{P_0}{T_0} \cdot T$$

Man kann mittlere kinetische Energie der Moleküle mit der absoluten Temperatur für darauf stehenden Gleichungen miteinander vereinigen und in Zusammenhang mitzubringen.

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{mv^2}{2} = \frac{p_o}{T_o} \cdot T$$

$$\text{oder } \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} \left(\frac{V}{N} \cdot \frac{p_o}{T_o} \right) \cdot T = \frac{3}{2} \cdot kT$$

k.....Boltzmann Konstante

Mit dem Gesetz von Avogadro: Ein Mol eines beliebigen Gases nimmt bei einem Druck $p_o = 1 \text{ bar}$ und einer Temperatur von $T_o = 273 \text{ K}$ das Volume $V_o = 22,7 \text{ dm}^3$ ein.

Daraus folgt: Bei gleichem Druck und gleicher Temperatur verhalten sich die Volumina zweier Gase so wie deren Molekülzahlen. Bei gleichem Druck und gleicher Temperatur enthalten gleich große Volumina verschiedener Gase gleich viele Moleküle.

Die Zahl der Teilchen in einem Mol ist durch $L = 6 \cdot 10^{23}$ gegeben.

Daraus folgt:

$$k = \frac{V_o}{L} \cdot \frac{p_o}{T_o}$$

$$= \frac{22.7 \text{ dm}^3 \cdot 1 \text{ bar}}{6 \cdot 10^{23} \cdot 273 \text{ K}}$$

$$= \frac{22.7 \text{ dm}^3 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{6 \cdot 10^{23} \cdot 273 \text{ K}}$$

$$= 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

Kann man die Boltzmann Konstante $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ bekommen.

Die mittlere kinetische Energie der Moleküle eines Gases ist proportional zur absoluten Temperatur, und der Proportionalitätsfaktor hat für alle Gase den

gleichen Wert enthält.

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot kT$$

Mit:

$$p = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{mv^2}{2}$$
$$\text{und} \quad \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot kT$$

Daraus folgt:

$$\mathbf{p \cdot V = N \cdot k \cdot T}$$

2.2 Die Hauptsätze der Wärmelehre[1]

Die Wärmelehre bildet die Grundlagen für die moderne Kraftwerkstechnik. Um die genaueren physikalischen Zusammenhänge des Stirlingmotors zu verstehen, müssen folgende Begriffe und Zusammenhänge eingeführt werden. Die Zwei Hauptsätze der Wärmelehre werden im folgenden Text angesprochen.

2.2.1 Die innere Energie

Die innere Energie: Die meisten realen Gase haben zwei- oder mehratomige Moleküle, diese können neben einfachen Translationsbewegungen auch Rotationsbewegungen um die verschiedenen Achsen des Moleküls ausführen. Die Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten werden auch Freiheitsgrade genannt.

Darum kann man sagen: Die innere Energie ist die Summe aus den verschiedenen Bewegungsenergien (Schwerpunktsenergie und Rotationsenergie).

Und der Energiesatz besagt: In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtenergie konstant.

$$\frac{1}{2} mv^2 + mgh + U = E$$

2.2.2 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre

Erster Hauptsatz der Wärmelehre:

Der Arbeit eine Energieform kann nicht verloren gehen, sie kann nur von einer Form in eine andere Form gewandelt werden, und bleibt die Gesamtenergie konstant. Das heißt, zur Erhöhung der kinetischen Energie und/oder Rotationsenergie zu einem Anstieg der inneren Energie führen. Oder eine andere Möglichkeit, die innere Energie eines Gases zu erhöhen, besteht darin, dem Gas direkt eine Wärmemenge dQ zuzuführen.

$$dU = dQ + dW$$

2.2.3 Die spezifische Wärme

Die spezifische Wärme auch als die spezifische Wärmekapazität genannt, die eine physikalische Eigenschaft eines Stoffes ist.

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

ΔQdie thermische Energie

mdie Masse der Substanz

cdie spezifische Wärmekapazität

ΔTdie Änderung der Temperatur

Die spezifische Wärmekapazität von Gasen gibt es aber insbesondere Möglichkeit, die hängt von äußeren Zwangsbedingungen ab. Unterscheidet man die spezifische Wärmekapazität von Gasen bei konstantem Druck c_p (isobar) und bei konstantem Volumen c_v (isochor).

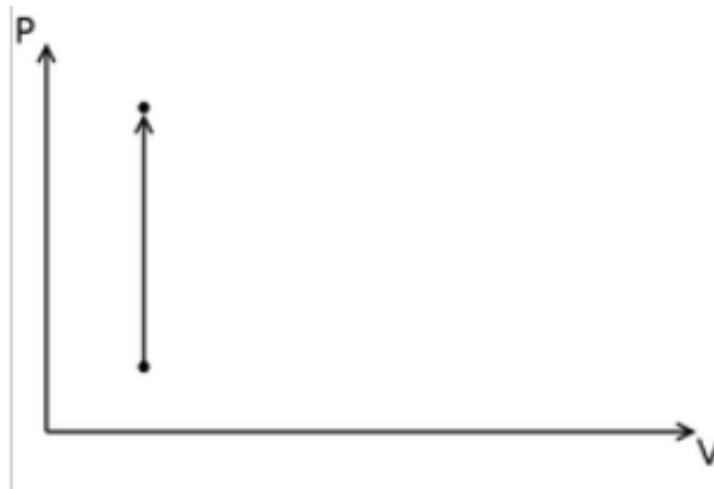


Abbildung 2-1: isobare Zustandsänderung

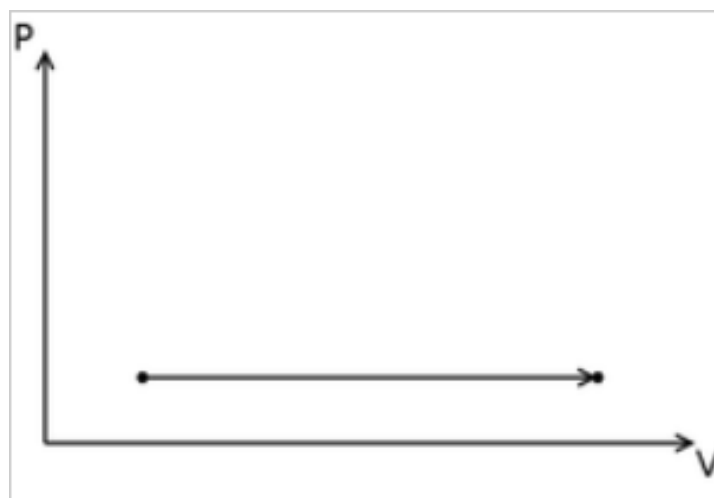


Abbildung 2-2: isochore Zustandsänderung

2.2.4 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre

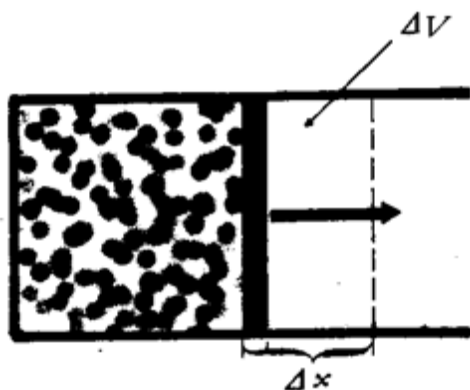
Die Wärme fließt von selbst nur von einem höherer Temperatur gehörigen Körper auf einen tieferer Temperatur gehörigen Körper über.

2.3 Wärmekraftmaschinen

Wärmekraftmaschine ist die Maschine, die die Wärme in Arbeit umzuwandeln. Im folgenden wird die physikalischen Grundlagen der Umwandlung von Wärme in Arbeit dargestellt.

2.3.1 Umwandlung von Wärme und Arbeit

Umwandlung von Arbeit in Wärme ist sehr einfach und passiert oft als unangenehmer Nebeneffekt, z.B. bei Reibung. Aber von der Wärme zur Arbeit ist schwieriger.

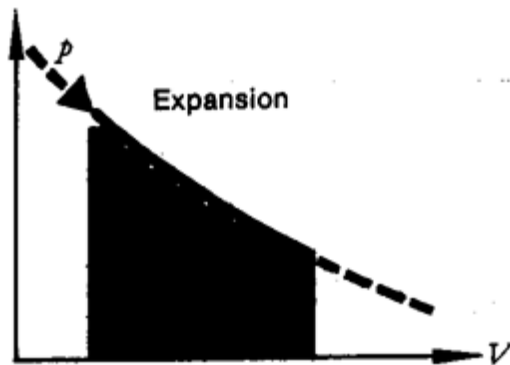


Links dargestellt ist die einfache Darstellung von ein Zylinder, in dem auch einer Kolben enthält. Dieser Kolben wird vom Druck p des Gases eine Strecke Δx nach außen bewegt.

Abb.2-3:Zylinder mit Kolben

Bezeichnet man die Kolbenoberfläche als A , so kann man die Kraft auf den Kolben durch $F = p \cdot A$ bekommen. Also ist die Volumenausdehnung des Gases ist gleich dem Produkt aus Kraft F und Weg Δx .

$$\Delta W = F \cdot \Delta x = p \cdot A \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V$$



Man kann mit links dargestellt pV – Diagramm die bei der Expansion von Gasen gewonnenen Arbeit abgelesen werden.

Abb.2-4: pV-Diagramm

3. Funktion des Stirlingmotors

In diesem Kapitel wird die Darstellung des Istzustandes und Präzisierung der Aufgabenstellung erfolgt. Dazu wird für das Aufgabenverständnis über Stirlingmotor und seine Funktionen erläutert.

3.1 Grundlagen

Der Stirlingmotor ist ein sogenannter Heißgasmotor, ist eine Wärmekraftmaschine. Der hat die Energieumwandlung gemacht, darum der schlecht benutzbaren thermische Energie in die besser einsetzbaren mechanische Energie. Die zwei Zylinder werden von außen abwechselnd erhitzt und gekühlt, nämlich auch das in der Zylinder abgeschlossenes Arbeitsgas (z.B Luft oder Helium) abwechselnd erhitzt und gekühlt wird, um die mechanische Arbeit zu leisten. Und das ganz wichtig ist ,ist die beliebigen äußeren Wärmequelle für den Stirlingmotor geeignet.

Beim Stirlingmotor wird das Gas innerhalb des Motors bleibt und wird nicht ausgetauscht. Das heißt, abgesehen von einer gegebenenfalls durch Verbrennung betriebenen externen Wärmequelle, ohne Ausstoß von Abgasen arbeitet. Daraus folgt die Unterschiedlichkeit zwischen Stirlingmotor und z.B Dampfmaschinen oder Verbrennungsmotoren (z.B Ottomotor oder Dieselmotor) : Bei Dampfmaschinen, der Wasserdampf wird außerhalb des Zylinders erhitzt, und nach der Entspannung abgelassen; Bei der Verbrennungsmotoren, das Gas wird innerhalb des Zylinders durch Verbrennung erhitzt und nach der Entspannung ausgetauscht.

Es gibt zwei unterschiedliche Konfigurationen des Stirlingmotors : Alpha -

Konfiguration und Beta - Konfiguration. Besteht Alpha – Type – Stirlingmotor aus zwei Zylindern aus, das heißt, die zwei Zylindern sind getrennt. Bewegt sich aber die zwei Kolben (Verdrängerkolben und der Arbeitskolben) in einem gemeinsamen Zylinder bei der sogenannten Beta – Type – Stirlingmotor.

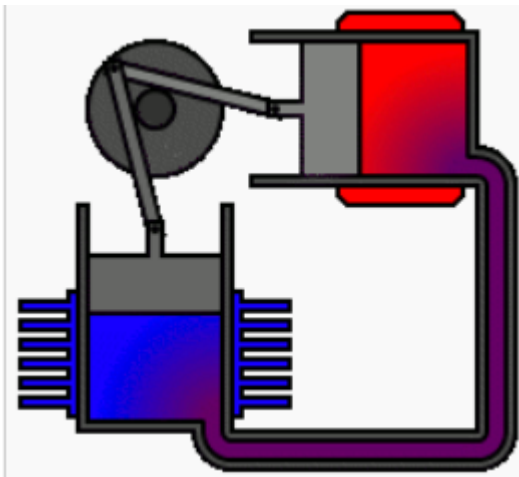


Abb.3-1: Alphatype-Stirlingmotor

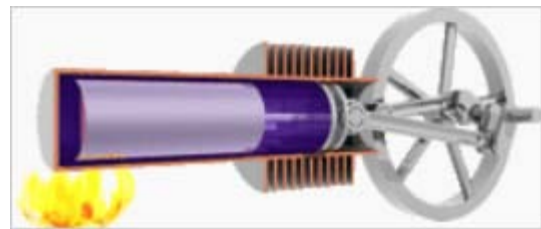


Abb.3-2: Betatype-Stirlingmotor

Die vorliegende Arbeit hat aufgeschrieben, dass der Verdrängerkolben und Arbeitskolben in V – Anordnung liegen werden, d.h. die Konfiguration des Stirlingmotors Alpha – Type ist.

Deshalb wird hauptsächlich den Alpha – Type – Stirlingmotors im folgenden Text angesprochen.

3.2. Funktionsprinzip des Stirlingmotors

Alle Stirlingmotoren basieren auf dem gleichen Prinzip. Eine konstante Arbeitsgasmenge, in einem Verdrängerzylinder eingeschlossen, wird durch einen Verdrängerkolben zwischen einem beheizten Bereich und einem gekühlten Bereich hin und her geschoben. Da sich heißes Gas ausdehnt und kaltes Gas sich zusammenzieht, erhöht sich einmal der Druck und sinkt danach wieder ab. Als Arbeitsgas kommt entweder Luft oder Helium zum

Einsatz. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch und durch die periodische Erwärmung und Abkühlung des Gases im geschlossenen Raum entsteht eine periodische Druckschwankung.[2]

Zusätzlich zu dem oben erwähnten Verdrängerkolben (auch VK genannt) gibt es noch einen Arbeitskolben (im folgenden AK), welche beide auf einem Schwungrad befestigt und so angeordnet sind, dass der VK dem AK um 90° , also eine viertel Umdrehung voreilt. Der AK muss den Motor nach außen luftdicht abschließen, wohingegen sich der VK im Inneren des Motors bewegt. Durch die 90° -Anordnung ergeben sich immer unterschiedliche Stellungen der beiden Kolben. Der AK treibt das Schwungrad an, um die Position des VK zu ändern. Dieser lässt das Arbeitsgas in den jeweils anderen Teil des Zylinders strömen. Dadurch wird eine Kraft auf den AK ausgeübt, welcher wiederum das Schwungrad antreibt. Als Zusatz kann man in die Strömungskanäle des Gases noch einen so genannten Regenerator einbauen, welcher dem heißen Gas Wärme entzieht und beim erneuten Durchströmen an das kalte Gas wieder abgibt[3].

Zwei Kolben (sogenannte Verdrängerkolben und der Arbeitskolben) bewegen sich im abgeschlossenen Gasraum des Stirlingmotors. Die nutzbare Arbeit wird alleine vom Arbeitskolben aufgebracht, und der Verdrängerkolben wird bewegt, um das Gas zu verschieben.

Der Arbeitsablauf des Stirlingmotors wird in die folgenden vier Takte unterteilt und dargestellt.

1. Takt:

2 vgl. ANONYMUS (1998/2000) AEE – Stirlingmotor: 2. Der Prozess <http://www.aee.at/verz/artikel/stirl01.html> , 5.Jänner 2011

3 vgl. ANONYMUS Wikipedia – Stirlingmotor <http://de.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor> 5. Jänner 2011

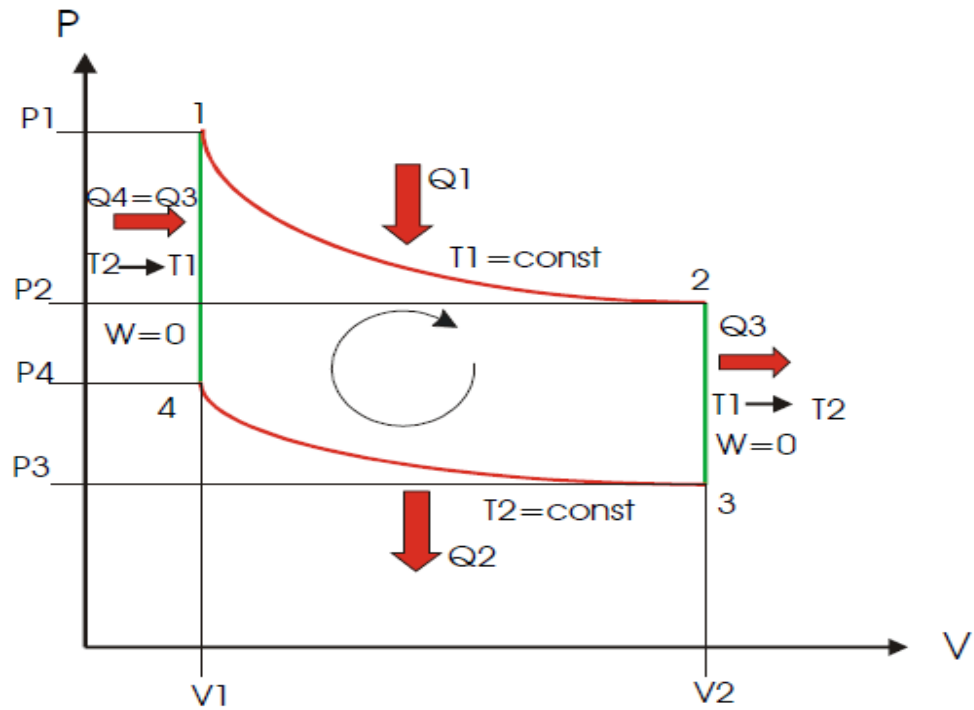


Abb.3-3: Das p-V-Diagramm

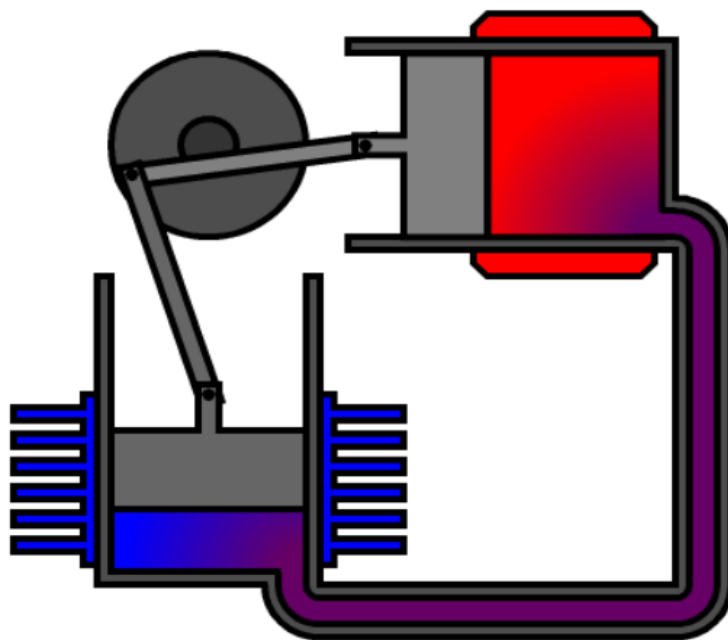
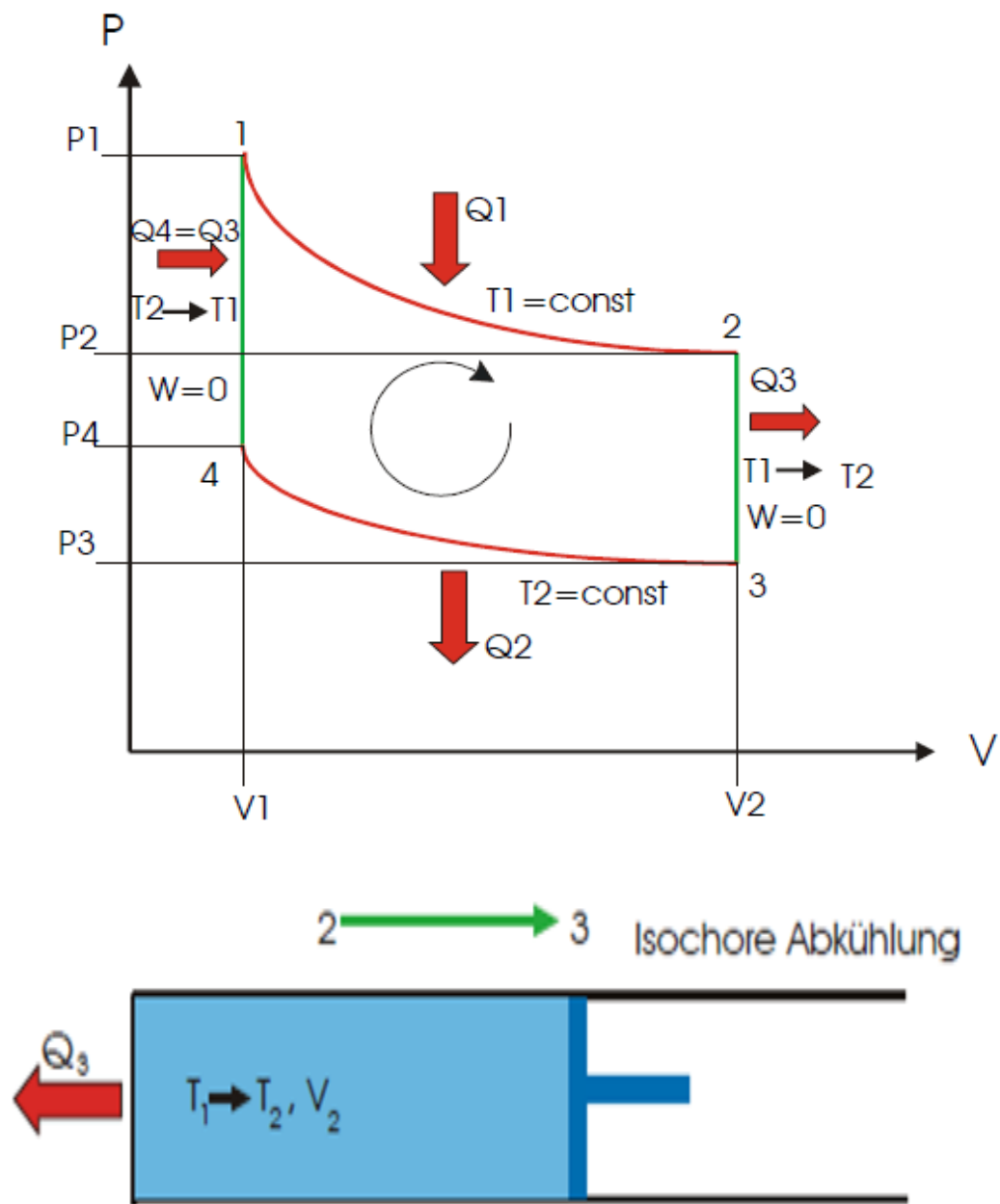


Abb.3-4: 1. Takt des Alphas-type-Stirlingmotors[3]

Darauf dargestellt ist die erste Takt des Stirlingmotors, auch als Arbeitstakt genannt. Das Arbeitsgas dehnt sich isotherm von (V_1, p_1) nach (V_2, p_2) aus. Das bedeutet, der Großteil des Gases im heißen Zylinder ist schon erhitzt, und der linken Rand des Zylinders durch den heißen Kolben an der kommende Ausdehnung gedrückt wird.

2. Takt:



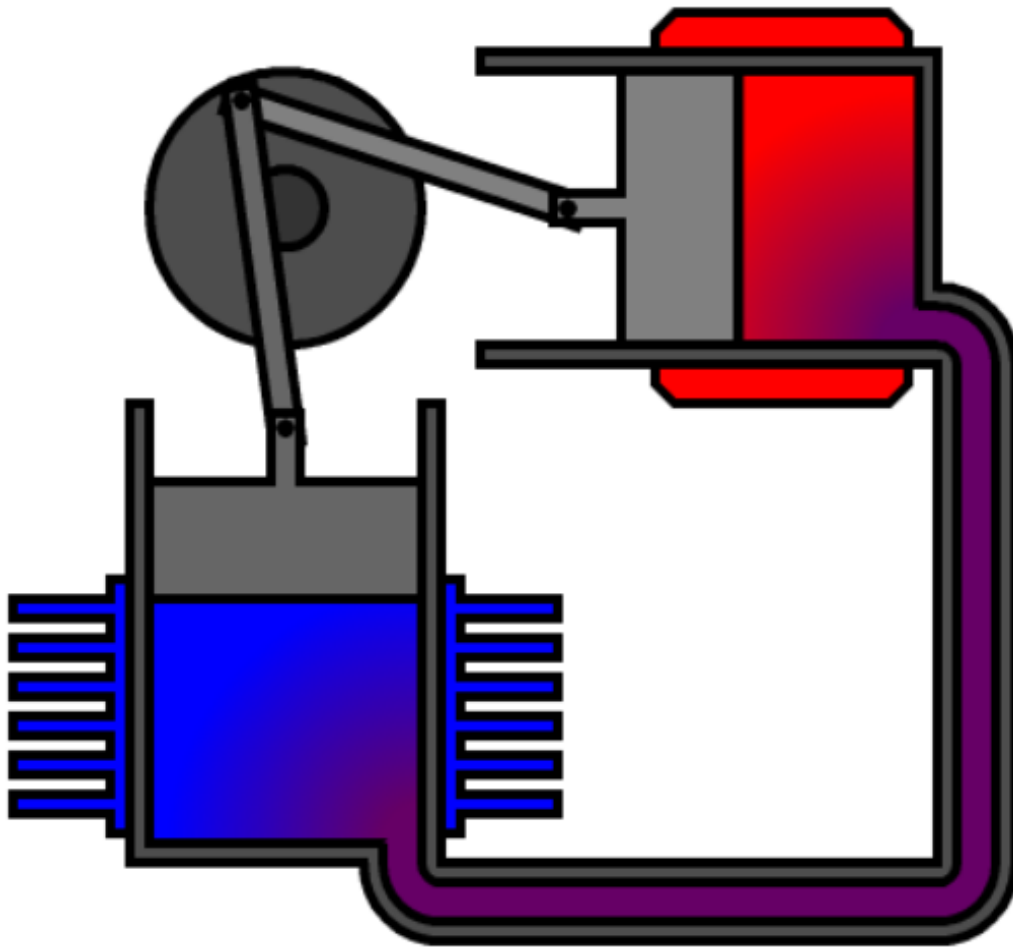


Abb.3-5: 2. Takt des Stirlingmotors⁵

Darauf dargestellte Bild ist die 2. Vorgang des Stirlingmotors, sogenannte Kompressionstakt I ist. Bei diesen Takt wird das Arbeitsgas von (V_2, p_2) nach (V_2, p_3) eine isochore Abkühlung erfährt. Die Wärmemenge Q_3 wird dabei vom Gas abgegeben, wobei das Gas keine Arbeit gegenüber seiner Umgebung verrichtet. Daraus folgt: sinkt die Temperatur des Gases von T_1 nach T_2 . Das heißt, die Größtmöglichkeit der Ausdehnung des Gases hat schon erreicht, und dann, der heiße Kolben wird das Gas in den kalten Seite gedrückt.

3. Takt:

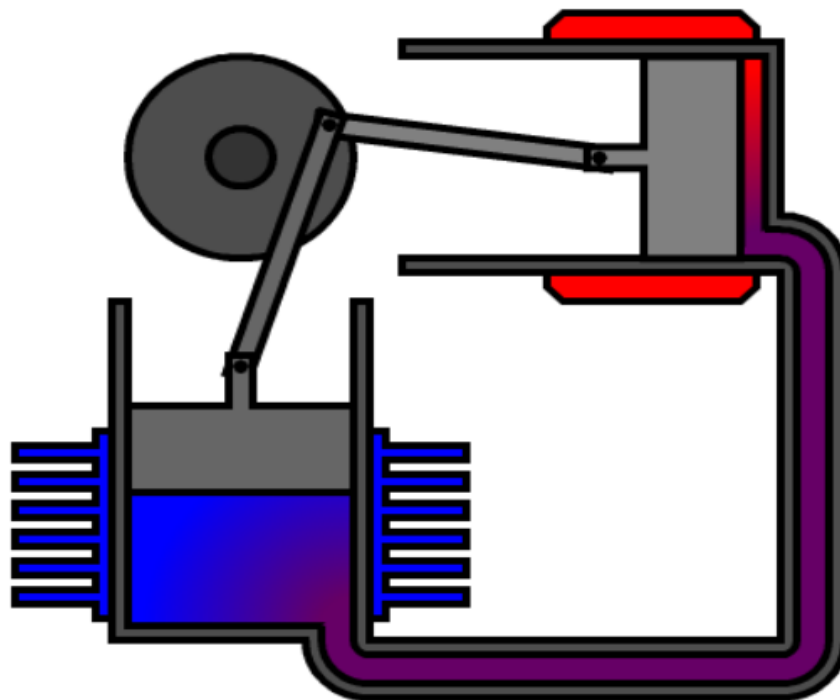
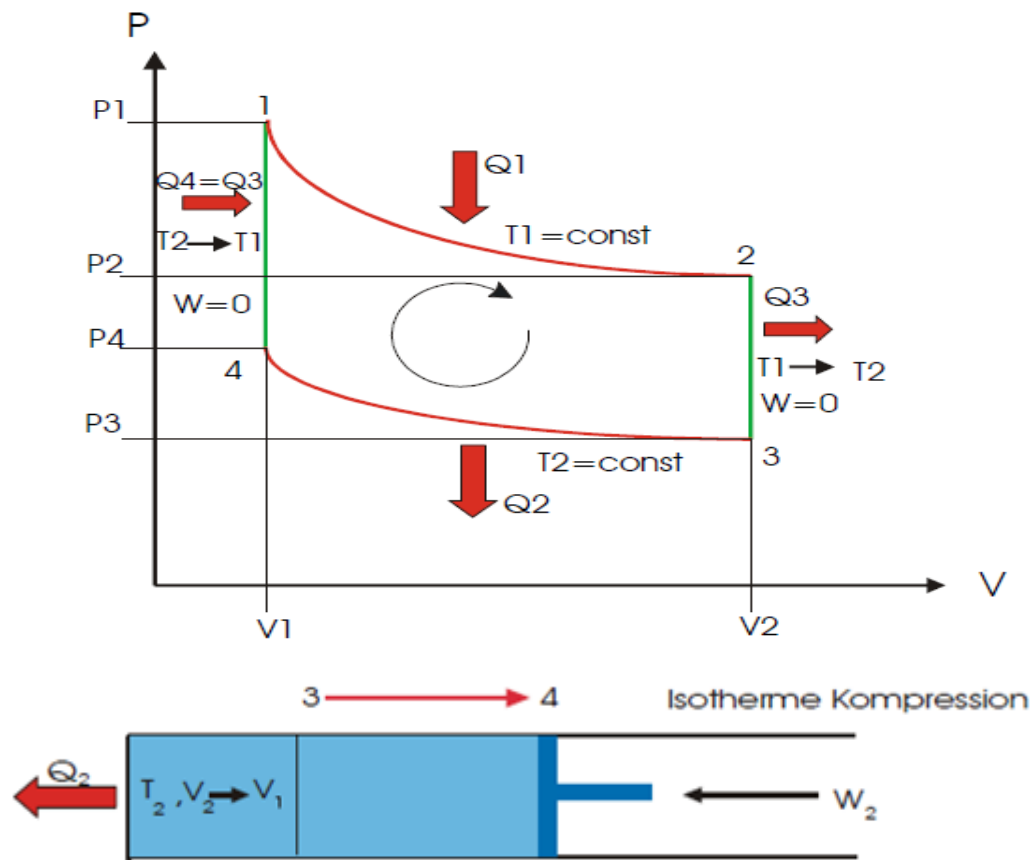
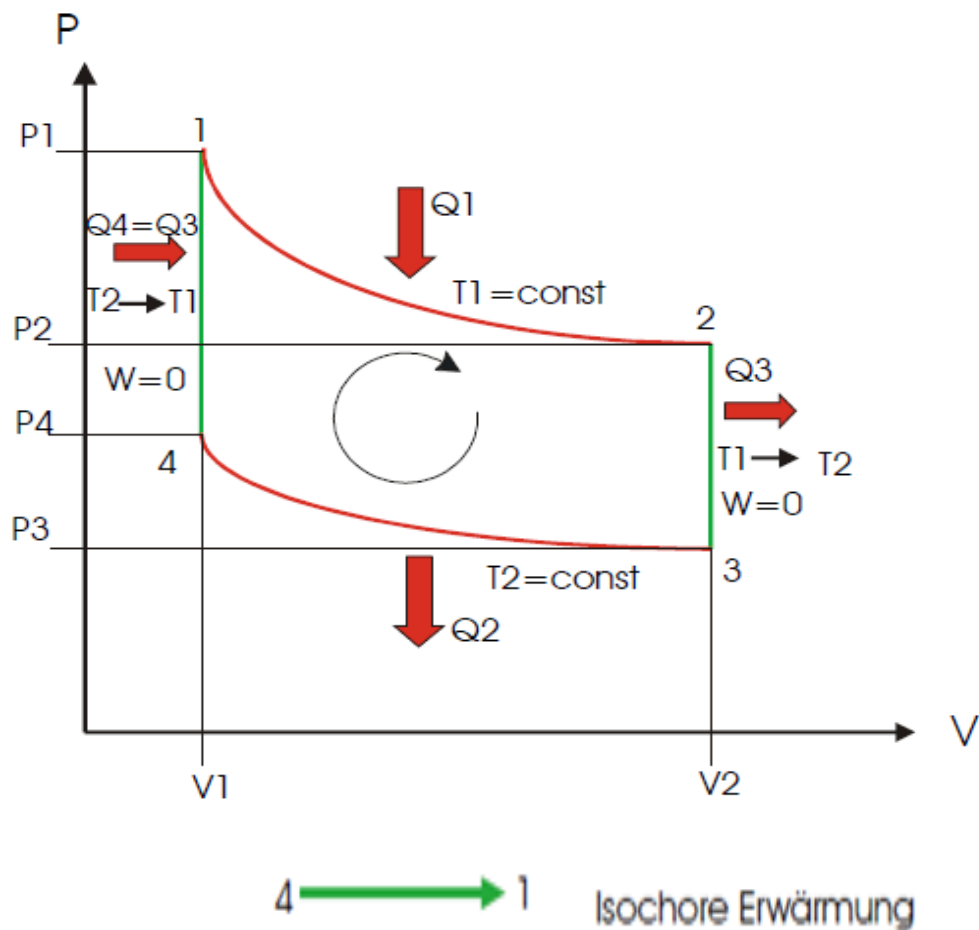


Abb.3-6: 3.Takt des Stirlingmotors⁵

Darauf dargestellt ist 3. Takt des Stirlingmotors, als auch Kompressionstakt genannt. Das Arbeitsgas wird in diesem Vorgang isotherm von (V_2, p_3) nach (V_1, p_4) komprimiert. Und die dabei am Gas verrichtete mechanische Arbeit wird bei konstanter Temperatur T_2 als Wärme Q_2 abgegeben. Das bedeutet, der Großteil des Gases ist nun in der kalten Seite des Zylinders und wird sich weiter abkühlen. Und das restliche Gas wird durch den Trägheitskräften angetrieben.

4. Takt:



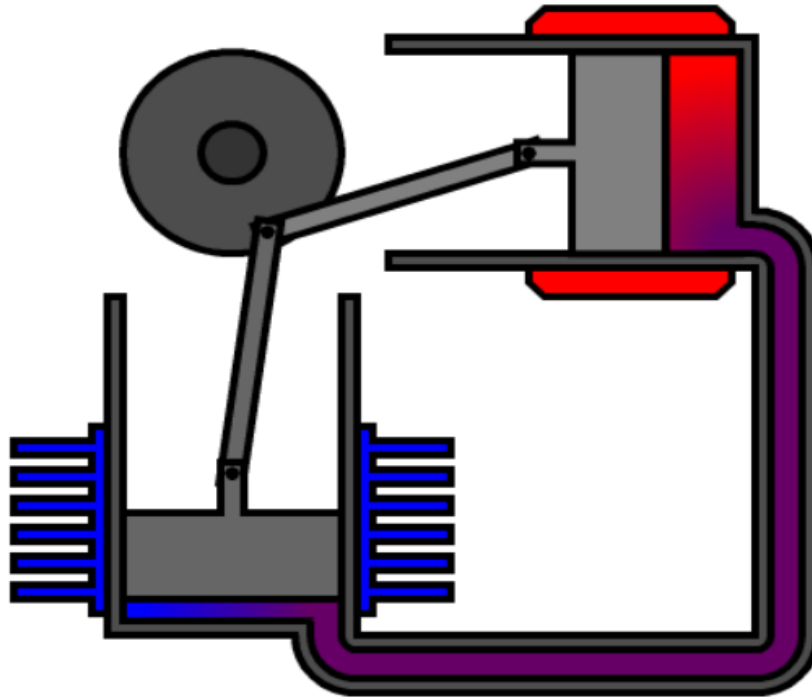


Abb. 3-7: 4. Takt des Stirlingmotors⁵

Darauf dargestellt ist die 4. Takt des Stirlingmotors: Verdrängungstakt II. Das abgeschlossenen Arbeitsgas wird isochor von (V_1, p_4) nach (V_1, p_1) komprimiert. Das Arbeitsgas wird keine Arbeit verrichtet und somit das Volumen constant bleibt, muss das Arbeitsgas die Wärmemenge $Q_4 = Q_3$ aufnehmen. Und die Temperatur des Gases wird von T_2 nach T_1 steigt. Dieser Takt ist auch einen Arbeitstakt. Das Gas hat seine größtmögliche Ausdehnung erreicht, und es dehnt sich in dem heißen Zylinder aus.

4. Berechnungen für die Hauptteile des Stirlingmotors

Nachdem die theoretischen Grundlagen abgeschlossen sind, folgen nun die Berechnungen der Hauptteile des Stirlingmotors.

Dafür gibt es verschiedene Berechnungsmethoden, die zum Teil zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

4.1 Berechnungen nach Werdich und Kübler^[4]

★Der Carnot-Wirkungsgrad

Der Carnot-Wirkungsgrad, auch Carnot-Faktor genannt. Der ist der höchste theoretisch mögliche Wirkungsgrad, der von Wärmeenergie in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt wird. Das bedeutet, der Wert von Carnot-Wirkungsgrad ist ideal, und den Quotient zwischen die Temperaturdifferenz (obere- und untere Temperatur) und die obere Temperatur beträgt.

4 vgl. Stirling-Maschinen von Martin Werdich und Kuno Kübler 2005

Abhängigkeit des Carnot-Wirkungsgrades

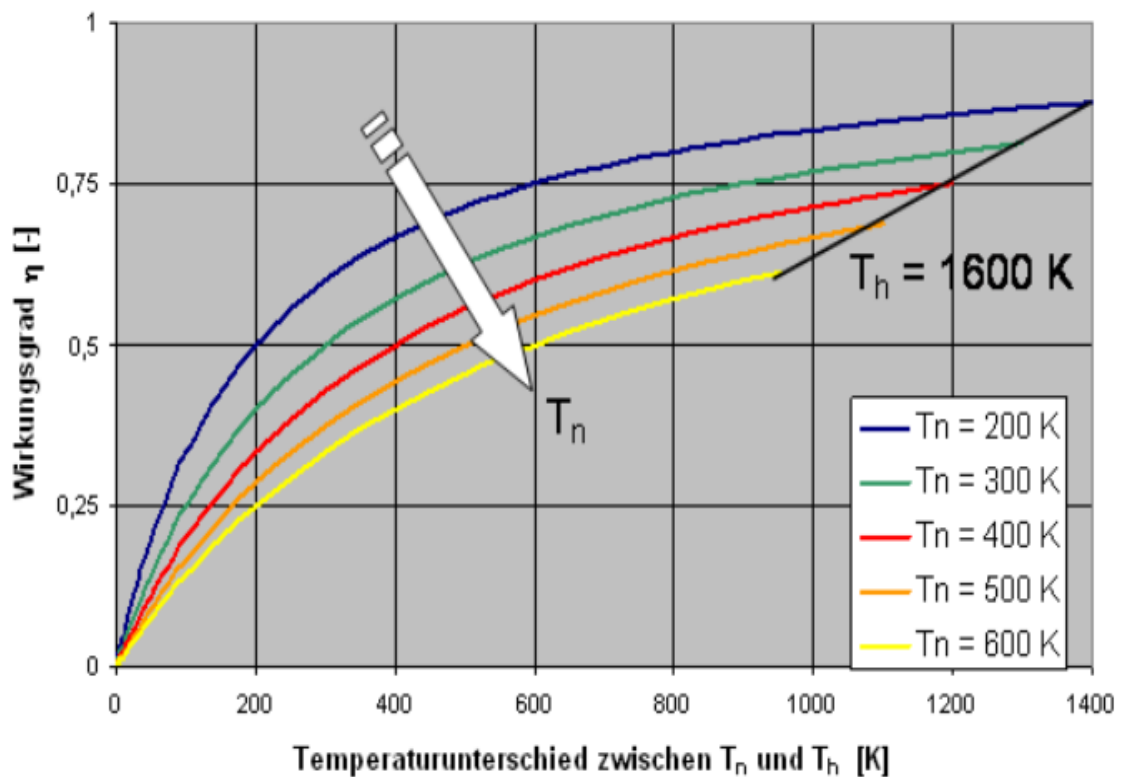


Abb. 4-1: Abhängigkeit des Carnot-Wirkungsgrad[5]

$$\eta = \frac{T_o - T_u}{T_o} = 1 - \frac{T_u}{T_o} \cong \frac{T_h - T_n}{T_h}$$

ηCarnot-Wirkungsgrad

T_oobere Temperatur

T_hhöchste Temperatur

T_uuntere Temperatur

T_nniedrigste Temperatur

Der Wirkungsgrad des idealisierten Stirlingprozesses ist gleich dem Wirkungsgrad des Carnot- Prozesses.

5 vgl. Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Carnot-Wirkungsgrad.png&filetimestamp=20061019131524>

Mit einer oberen Temperatur $T_o = 393\text{K}$ entsprechend $120\text{ }^\circ\text{C}$
 und einer unteren Temperatur $T_u = 293\text{K}$ entsprechend $20\text{ }^\circ\text{C}$
 daraus folgt:

$$\eta = \frac{T_o - T_u}{T_o} = \frac{393\text{K} - 293\text{K}}{393\text{K}}$$

$$= 0,25 = 25\%$$

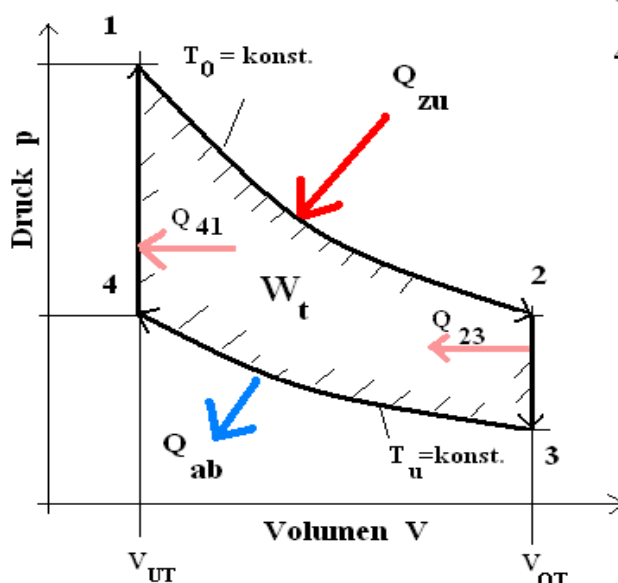
Dieser Wirkungsgrad ist der ideale Wert. Passiert aber immer Energieverlust bei beliebiger Wärmekraftmaschine, z.B. Verlust durch Töträume, Strömungswiderstände im Regenerator; Wärmebrücken, mehrere Wärmeübergänge usw. Daraus folgt ein Verlustfaktor, für unsere Rechnungen, kann man 0,25 angenommen werden.

Damit ist der realen Wert des Wirkungsgrad gleich:

$$H \approx 0,25 \cdot 0,25 = 0,0625 \approx 6\%$$

★ Anfangsvolumen V_a und Volumenverhältnis V_a / V_e

Stirling - Prozess



1 - 2 Isotherme Expansion Bild 1

2 - 3 Isochore Wärmeabfuhr Bild 2

3 - 4 Isotherme Kompression Bild 3

4 - 1 Isochore Wärmezufuhr Bild 4

Abgegebene technische Arbeit:

$$W_t = Q_{zu} - |Q|_{ab}$$

Innerer Wärmeaustausch mit dem Verdrängerkolben (Regenerator):

$$Q_{41} = |Q|_{23}$$

Abb. 4-2: p-V-Diagramm des Stirling-Kreisprozesses

Damit:

W.....Arbeit in Ws

m.....= $\rho \cdot V$ Masse der Luft in Kg

R.....Gaskonstante der Luft = 287 Ws/Kg·K

T_e.....Endtemperatur = 393K

V_e.....Endvolumen in m³

V_a.....Anfangsvolumen in m³

ρ= 1,3 Kg/m³ für Luft bei 0 °C und 1 bar

Die zugeführte Wärme Q_{zu} wird bei der isothermen Expansion des Stirlingprozesses in Arbeit W umgewandelt.

$$Q_z = W = m \cdot R \cdot T_e \cdot \ln \frac{V_e}{V_a}$$

Bei diesem Stirlingmotor hat eine Leistung von 500 Watt, das bedeutet, die zugeführte Wärmeenergie Q = 500 Ws im Zylinder gespeichert wird (in einer Sekunde entspricht dies der Leistung von 500 Watt).

Damit ist:

$$Q = c_v \cdot m \cdot \Delta T = c_v \cdot \rho \cdot V_a \cdot \Delta T$$

$$V_a = \frac{Q}{c_v \cdot \rho \cdot \Delta T}$$

Q.....zugeführte Wärme = 500Ws

c_v.....spezifische Wärme der Luft = 717 Ws/kgK

ρDichte der Luft = 1,3 kg/m³

ΔTTemperaturunterschied beim Aufheizen = 100K

V_a.....Anfangsvolumen

Daraus folgt:

$$V_a = \frac{500\text{Ws} \cdot \text{kg} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^3}{717\text{Ws} \cdot 1.3\text{kg} \cdot 100\text{K}} = 0.0054\text{m}^3 = 5.4\text{L}$$

Wegen der unvermeidlichen Toträume im Motor und der Temperaturverluste bei den Wärmeübergänge, muss man sich das Anfangsvolumen auf $V_a = 7\text{L} = 0.007\text{m}^3$ steigern.

Damit kann man die Berechnung des Volumenverhältnisses V_e / V_a machen:

$$m = \rho \cdot V_a = \frac{1.3\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.007\text{m}^3 = 9.1 \cdot 10^{-3}\text{kg}$$

$$\ln \frac{V_e}{V_a} = \frac{W}{m \cdot R \cdot T_e} = \frac{500\text{Ws} \cdot \text{Kg} \cdot \text{K}}{9.1 \cdot 10^{-3}\text{Kg} \cdot 287\text{Ws} \cdot 393\text{K}}$$
$$= 0.487 = \ln 1.63$$

$$\frac{V_e}{V_a} = 1.63$$

$$V_e = 1.63 \cdot 0.007\text{m}^3 = 0.01139\text{m}^3 = 11.39\text{L}$$

★Drehzahl und Hubvolumen

Er hat die Motorleistung von 500 Watt, das heißt, dreht sich der Motor einmal pro Sekunde und dabei eine Heizenergie von 500 Ws zugeführt wird.

Steigert man beispielsweise die Drehzahl von 1 auf 20 Umdrehungen pro Sekunde, so ist ein Zwanzigstel des ursprünglichen Volumens ausreichend. Das neue Anfangsvolumen beträgt dann nur noch $7000\text{cm}^3 / 20 = 350\text{cm}^3$.

Bei der Temperaturerhöhung von 293K auf 393K dehnt sich das Anfangsvolumen V_a auf das 1,63 fache aus:

$$V_e = 350 \text{ cm}^3 \cdot 1,63 = 570 \text{ cm}^3$$

Damit beträgt das Hubvolumen V_h :

$$\begin{aligned} V_h &= V_e - V_a \\ &= (570 - 350) \text{ cm}^3 = 220 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

z.B. der Arbeitskolbendurchmesser von 5 cm beträgt, das entsprechend Hub H ist:

$$\begin{aligned} V_h &= \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot H \rightarrow \\ H &= \frac{4 \cdot V_h}{\pi \cdot d^2} \\ &= \frac{4 \cdot 220 \text{ cm}^3}{3,14 \cdot 5^2 \cdot \text{cm}^2} = 11,2 \text{ cm} \end{aligned}$$

Mit der Beziehung von Hub und Durchmesser des Kolbens:

$$H \approx d$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} V_h &= \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot H \text{ und } H \approx d \\ V_H &= \frac{\pi}{4} d^3 \\ d &= \sqrt[3]{\frac{4 V_H}{\pi}} \end{aligned}$$

$$d = 6,54 \text{ cm} = 65,4 \text{ mm} \approx H$$

★Masse des Regenerators

Auf der heißen Seite des Stirlingmotors wird die Leistung von 500 Watt zugeführt. Mit der Drehzahl von 20 Umdrehungen pro Sekunde sind pro Umdrehung $500/20 = 25 \text{ Ws}$ an Wärme umzusetzen. Der Regenerator wird diese Wärmemenge in kurzer Zeit aufgenommen und wieder abgegeben. Aufgrund der Energieflüsse im Stirlingmotor sollte der Regenerator das Vier- bis Fünffache der im Motor umgesetzten Wärmeenergie aufnehmen und wieder abgeben können, also statt 25 Ws pro Umdrehung etwa 112 Ws. Wir nehmen eine Temperaturdifferenz des Regenerators von $\Delta T = 50 \text{ K}$ an. Und der Wärmehalt Q eines Körpers beträgt:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Mit $Q = 112 \text{ Ws}$ und der spezifische Wärme von Stahl $c = 0,5 \cdot 10^3 \text{ Ws/KgK}$ kann man sich die gebrauchste Masse des Regenerators berechnen:

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{112 \text{ Ws} \cdot \text{Kg} \cdot \text{K}}{0,5 \cdot 10^3 \text{ Ws} \cdot 50 \text{ K}} = 4,48 \text{ g}$$

Das heißt, es werden ca. 4.48g Stahldraht, Stahlwolle oder Stahlfolie für den Regenerator benötigt. Und z.B. bei einem Stahldrahtdurchmesser von 0,1 mm entspricht dies einer Länge von etwa 73 m.

$$m = \rho \cdot V \text{ mit } V = \pi r^2 \cdot d \rightarrow$$

$$m = \pi r^2 \cdot \rho \cdot d$$

$$d = \frac{m}{\rho \cdot \pi \cdot r^2}$$

$$d = \frac{4.48 \text{ g}}{7.8 \text{ g/cm}^3 \cdot 3.14 \cdot 0.005^2 \text{ cm}^2} = 73 \text{ m}$$

Die Dichte von Stahl ist $\rho_{\text{Stahl}} = 7,8 \text{ g/cm}^3$.

★Wärmeübergang zwischen festen und gasförmigen Körpern

Im Stirlingmotor werden folgende Wärmeübergänge auftreten: Die Wärmeübergänge von der heißen Zylinderwand auf das kalte Arbeitsgas (Luft), weiterhin von der erhitzten Luft auf den Regenerator, darauf der kalten Seite vom Arbeitsgas an die Kühlflächen des Zylinders und von den Kühlflächen an das Kühlmedium Außenluft oder Wasser. Und bei allen solchen Wärmeübergängen streicht ein Luftstrom an einem warmen oder kalten festen Körper vorbei.

Je kleiner die bei den Wärmeübergängen zwischen den festen und gasförmigen Körperpaaren erreichte Temperaturdifferenz ist, um so mehr bleibt für die Temperaturdifferenz zwischen der erhitzten und der gekühlten Luft übrig.

Der Übergang der Wärme Q vom festen auf den gasförmigen Körper errechnet sich aus:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot \Delta T \quad \text{mit}$$

Qzugeführte Wärme = 25 Ws (500 Ws /20 Umdrehungen)

ΔT ...Temperaturdifferenz = 20 K

tDauer des Wärmeüberganges = 0,05 s

αWärmeübergangskoeffizient in $\text{W/m}^2\text{K}$

Der Wärmeübergangskoeffizient für turbulente Luftströmungen beträgt:

$\alpha \geq 290 \text{ W/m}^2\text{K}$

dann, kann man die benötigte Wärmeübergangsfläche berechnen:

$$A = \frac{Q}{\alpha \cdot t \cdot \Delta T}$$
$$A = \frac{25 \text{ Ws} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}}{290 \text{ W} \cdot 0,05 \text{ s} \cdot 20 \text{ K}}$$
$$= 0,086 \text{ m}^2 = 862 \text{ cm}^2$$

Ein Zylinder mit 5 cm Durchmesser und einem Ausgangsvolumen von 350 cm^3 ergibt sich die Länge des Zylinders von 17,8 cm. Wegen die Wärmeübergangsfläche gleich die Summe aus die Fläche von Kreis und Zylinder, also

$$A = \pi r^2 + 2\pi r \cdot l$$
$$A = 3,14 \cdot 2,5^2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 17,8$$
$$= 299 \text{ cm}^2$$

★Äußere Kühlfläche auf der kalten Seite

Die Fläche von der Kühlung muss wesentlich größer sein. Der Wärmeübergangskoeffizient α für den Wärmeübergang eines festen Körpers an ruhende Luft beträgt nur etwa $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ anstatt $290 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit muss man eine von ca. 30 fach größere Außenkühlfläche haben, statt 862 cm^2 nun ca. 26000 cm^2 oder 2.6 m^2 ! Das ist eine ganz große Fläche. Auf diesem Grund kann man die Kühlung mit Wasser machen, da hier die

Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 5000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ist.

★Schwungradmasse

Die Wärmezufuhr pro Umdrehung ist $W = 25 \text{ Ws}$. Die Rotationsenergie des Schwungrades, aus der die Kompressionsarbeit aufzubringen ist, sollte größer als diese 25 Ws sein, zuzüglich dem Ungleichförmigkeitsgrad δ der angekoppelten Maschinen ($\delta_{\text{Propeller}} = 1/30$; $\delta_{\text{Generator}} = 1/100$ bis $1/300$).

$$W_{\text{rot}} \geq W_{\text{zu}} = \frac{I \cdot \omega^2 \cdot \delta}{2}$$

$$I = \frac{2 \cdot W_{\text{rot}}}{\delta \cdot \omega^2}$$

Mit $n = 20$ Umdrehungen pro Sekunde, folgt:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 125,6 \text{ /s}$$

Mit dem gewählten Ungleichförmigkeitsgrad

$$\delta = 1/150$$

ergibt sich:

$$I = \frac{2 \cdot W_{\text{rot}}}{\delta \cdot \omega^2} = \frac{2 \cdot 25 \text{ Ws} \cdot \text{s}^2}{1/150 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 20)^2}$$

$$= 0,47 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Die notwendige Masse des Schwungrades wird berechnet nach:

$$I_{\text{zyl}} = \frac{1}{2} m \cdot r^2$$

Mit $r = 20 \text{ cm}$ ergibt sich eine Masse von:

$$m = \frac{2 \cdot I}{r^2} = \frac{2 \cdot 0,47}{0,04 \text{ m}^2}$$

$$= 23,5 \text{ Kg}$$

Das stellt eine zu große Schwungradmasse dar.

4.2 Verbesserte Berechnungen und Diskussion

Die unter 4.1 dargestellten Berechnungen, enthalten viele Probleme, z.B. die Temperaturdifferenz zwischen die obere und untere Temperatur, das Hubvolumen und danach kommende Hublänge, und die Masse von Schwungrad, usw.

Die wichtige Problem ist die Unterschiedlichkeit von mechanische Leistung und thermische Leistung.

In diesem Kapitel werden die anderen Werte gewählt, und damit die Ergebnisse der Berechnungen verbessert.

★Der Carnot-Wirkungsgrad

Wir haben die obere und untere Temperatur jeweilig auf $T_o = 793 \text{ K}$ (520°C) und $T_u = 293 \text{ K}$ (20°C) steigert, daraus folgt:

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{T_o - T_u}{T_o} = 1 - \frac{T_u}{T_o}$$

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{793 - 293}{793} = 0,63$$

$$= 63\%$$

Damit:

$$\eta_{\text{real}} = 0,63 \cdot 0,6 = 0,378 = 37,8 \%$$

↓

Verlustfaktor (0,25 bis 0,8)

Das ganz wichtig ist, ist die Unterschied zwischen die mechanische Leistung und die thermische Leistung.

In unsere Aufgabe, dass der Stirlingmotor hat eine mechanische Leistung von 500 Watt, und bei dem realen Wirkungsgrad von nur 37,8% muss man das etwa Dreifache der mechanische Leistung als Heizleistung zuführen, also:

$$P_{\text{Wärme}} = \frac{P_{\text{mecha.}}}{\eta_{\text{real}}} = \frac{500 \text{ W}}{37,8 \%} = 1322 \text{ W}$$

★Anfangsvolumen V_a und Volumenverhältnis V_a/V_e

In der verbesserte Berechnungen haben wir noch den Vergleich von Luft von Helium als Arbeitsgas gemacht.

$$Q = c_v \cdot m \cdot \Delta T = c_v \cdot \rho \cdot V_a \cdot \Delta T$$

$$V_a = \frac{Q}{c_v \cdot \rho \cdot \Delta T}$$

Stoff	Schmelz T in °C	Siede- T in °C	Spezifische Wärmekapazität c_v bei konstantem Volumen in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Spezifische Wärmekapazität c_p bei konstantem Druck in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Dichte ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Luft	-213	-193	0,72	1,01	1,29
Helium	-270	-269	3,22	5,23	0,179
Stickstoff	-210	-195,8	0,75	1,04	1,251

Tab. 1: Eigenschaften von Gasen

a) Für Luft:

$$V_a = \frac{1322 \text{ Ws} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{K}}{720 \text{ Ws} \cdot 1,3 \text{ Kg} \cdot 500\text{K}}$$

$$= 0,0028 \text{ m}^3 = 2,8 \text{ L}$$

b) Für Helium:

$$v_a = \frac{1322 \text{ Ws} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{K}}{3,22 \cdot 10^3 \text{ Ws} \cdot 0,179 \text{ Kg} \cdot 500\text{K}}$$

$$= 0,0045 \text{ m}^3 = 4,5 \text{ L}$$

Obwohl die spezifische Wärmekapazität von Helium mit $3,22 \cdot 10^3 \text{ Ws}$ wesentlich größer ist, als die von Luft mit $0,72 \cdot 10^3 \text{ Ws}$ ist das notwendige Anfangsvolumen auf Grund der geringeren Dichte von Helium rund 1.6 mal

größer als bei Luft.

Für die weiteren Berechnung wird deshalb Luft als Arbeitsgas verwendet.

Wegen der unvermeidlichen Toträume im Motor und der Temperaturverluste bei den Wärmeübergängen, wird allerdings ein Anfangsvolumen von $V_a = 4\text{L} = 0,004\text{ m}^3$ angenommen.

$$m = \rho \cdot V_a = 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,004\text{m}^3 \\ = 5,2 \cdot 10^{-3}\text{kg}$$

$$\ln \frac{V_e}{V_a} = \frac{W}{m \cdot R \cdot T_e} = \frac{1322\text{Ws} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}}{5,2 \cdot 10^{-3}\text{kg} \cdot 287\text{Ws} \cdot 793\text{K}} = 1,12 = \ln 3,06 \\ \frac{V_e}{V_a} = 3,06 \rightarrow$$

$$V_e = 3,06 \cdot 0,004\text{m}^3 = 0,012\text{m}^3 = 12\text{L}$$

★Drehzahl und Hubvolumen

Steigert die Drehzahl von 1 auf 20 Umdrehungen pro Sekunde:

$$V_{a\text{Luft}} = \frac{0,004\text{ m}^3}{20} = 200\text{ cm}^3 \rightarrow$$

$$V_e = 3,06 \cdot 200\text{cm}^3$$

$$= 612\text{ cm}^3$$

Daraus folgt das Hubvolumen von Luft:

$$V_h = 612\text{cm}^3 - 200\text{cm}^3 = 412\text{ cm}^3$$

Bei dem Arbeitskolbendurchmesser von 8.5 cm entspricht dies einem Hub von etwa:

$$H = \frac{V_h}{\pi \cdot r^2} \quad \text{mit} \quad r = \frac{d}{2} = 4,25\text{ cm}$$

$$H = \frac{412\text{cm}^3}{3,14 \cdot 4,25^2\text{cm}^2}$$

$$= 7,3\text{ cm} = 73\text{mm}$$

★Masse der Regenerators

Auf der heißen Seite des Stirlingmotors wird die thermische Leistung von 1322 Watt zugeführt. Mit der Drehzahl von 20 Umdrehungen pro Sekunde sind pro Umdrehung $1322/20 = 66,1$ Ws an Wärme umzusetzen. Der Regenerator wird diese Wärmemenge in kurzer Zeit aufnehmen und wieder abgeben.

Aufgrund der Energieflüsse im Stirlingmotor sollte der Regenerator das Vier- bis Fünffache der im Motor umgesetzten Wärmeenergie aufnehmen und wieder abgeben können, also statt 66,1 Ws pro Umdrehung etwa 264,4 Ws.

Wir nehmen eine Temperaturdifferenz des Regenerators von $\Delta T = 250\text{ K}$ an.

Und der Wärmehalt Q eines Körpers beträgt:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Mit $Q = 264,4\text{ Ws}$ und der spezifische Wärme von Stahl $c = 0,5 \cdot 10^3\text{ Ws/KgK}$ kann man sich die gebrauchte Masse des Regenerators berechnen:

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{264,4\text{ Ws} \cdot \text{Kg} \cdot \text{K}}{0,5 \cdot 10^3\text{ Ws} \cdot 250\text{ K}}$$

$$= 2,1 \text{ g}$$

Das heißt, es werden ca. 2,1 g Stahldraht, Stahlwolle oder Stahlfolie für den Regenerator benötigt. Und z.B. bei einem Stahldrahtdurchmesser von 0,1 mm entspricht dies einer Länge von etwa 73 m.

$$m = \rho \cdot V \quad \text{mit} \quad V = \pi r^2 \cdot d \rightarrow$$

$$m = \pi r^2 \cdot \rho \cdot d$$

$$d = \frac{m}{\rho \cdot \pi \cdot r^2}$$

$$d = \frac{2,1 \text{ g}}{7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 3,14 \cdot 0,005^2 \text{ cm}^2}$$

$$= 34 \text{ m}$$

Die Dichte von Stahl ist $\rho_{\text{Stahl}} = 7,8 \text{ g/cm}^3$.

★Wärmeübergang zwischen festen und gasförmigen Körpern

Mit dem Wärmezufuhr von 66,1 Ws pro Umdrehung:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot \Delta T$$

$$Q \dots = 66,1 \text{ Ws}$$

$$\Delta T \dots = \eta_{\text{real}} \cdot (T_o - T_u) = 0,378 \cdot 500 \text{ K} = 189 \text{ K}$$

$$t \dots = 0,05 \text{ s}$$

$$\alpha \dots = \text{Wärmeübergangskoeffizient} \geq 290 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Daraus folgt die Wärmeübergangsfläche:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{Q}{\alpha \cdot t \cdot \Delta T} \\
 &= \frac{66,1 \text{ Ws} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}}{290 \text{ Ws} \cdot 0,05 \text{ s} \cdot 189 \text{ K}} \\
 &= 241 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

Ein Zylinder mit 8.5cm Durchmesser und einem Volumen von 612 cm³ ergibt sich die Länge des Zylinders:

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{4 \cdot V_e}{\pi \cdot d^2} \\
 &= \frac{4 \cdot 612 \text{ cm}^3}{3,14 \cdot 8,5^2 \text{ cm}^2} \\
 &= 10,9 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Danach wird die Wärmeübergangsfläche berechnet:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi}{4} d^2 + \pi \cdot d \cdot l = \frac{3,14}{4} \cdot 8,5^2 + 3,14 \cdot 8,5 \cdot 10,9 \\
 &= 347,6 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

4.3 Berechnungen nach Beale

Mit der Gleichung:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{B \cdot p \cdot V \cdot n}{60} \rightarrow \\
 V_H &= \frac{60 \cdot P}{B \cdot p \cdot n}
 \end{aligned}$$

P.....mechanische Leistung des Stirlingmotors

B.....Bealesche-Koeffizient

p.....Druck

V.....Hubvolumen

n.....Drehzahl des Stirlingmotors

Sind einfache Berechnungen des Hubvolumens möglich.

Fall 1:

Mit

$$P = 500W \quad B = 0,15$$

$$P = 10 \text{ bar} = 1 \text{ MPa} \quad n = 800 \text{ u/min}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} V_H &= \frac{60 \cdot P}{B \cdot p \cdot n} \\ &= \frac{60 \cdot 500W}{0,15 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 800} = 250 \text{ cm}^3 \\ &= 0,25 \text{ L} \end{aligned}$$

Mit dem Kolbendurchmesser von 70 mm,

$$\begin{aligned} V_H &= \frac{\pi}{4} d^2 \cdot H \rightarrow \\ H &= \frac{4 \cdot V_H}{\pi \cdot d^2} \\ &= \frac{4 \cdot 250 \text{ cm}^3}{3,14 \cdot 7^2 \text{ cm}^2} = 6,5 \text{ cm} \\ &= 65 \text{ mm} \end{aligned}$$

Ergebnis: Das Hubvolumen und die Länge von Hub beträgt 0,25 Liter und 65 mm.

Fall 2:

Mit

$$P = 500W$$

$$B = 0,15$$

$$P = 100 \text{ bar} = 10 \text{ MPa} \quad n = 800 \text{ u/min}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} V_H &= \frac{60 \cdot P}{B \cdot p \cdot n} \\ &= \frac{60 \cdot 500W}{0,15 \cdot 10 \text{ MPa} \cdot 800} = 25 \text{ cm}^3 \\ &= 0,025 \text{ L} \end{aligned}$$

Mit dem Kolbendurchmesser von 33 mm,

$$\begin{aligned} V_H &= \frac{\pi}{4} d^2 \cdot H \rightarrow \\ H &= \frac{4 \cdot V_H}{\pi \cdot d^2} \\ &= \frac{4 \cdot 25 \text{ cm}^3}{3,14 \cdot 3,3^2 \text{ cm}^2} = 2,92 \text{ cm} \\ &= 29 \text{ mm} \end{aligned}$$

Ergebnis: Das Hubvolumen und die Länge von Hub beträgt 0,025 Liter und 29 mm.

Fall 3:

Mit

$$P = 500W$$

$$B = 0,15$$

$$P = 50 \text{ bar} = 5 \text{ MPa} \quad n = 800 \text{ u/min}$$

Daraus folgt:

$$V_H = \frac{60 \cdot P}{B \cdot p \cdot n}$$

$$= \frac{60 \cdot 500 \text{ W}}{0,15 \cdot 5 \text{ MPa} \cdot 800} = 50 \text{ cm}^3$$

$$= 0,05 \text{ L}$$

Mit dem Kolbendurchmesser von 41 mm,

$$V_H = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot H \rightarrow$$

$$H = \frac{4 \cdot V_H}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 50 \text{ cm}^3}{3,14 \cdot 4,1^2 \text{ cm}^2}$$

$$= 3,79 \text{ cm} = 38 \text{ mm}$$

Ergebnis: Das Hubvolumen und die Länge von Hub beträgt 0,5 Liter und 38 mm.

Fall 4:

Mit

$$P = 500 \text{ W} \quad B = 0,15$$

$$P = 5 \text{ bar} = 0,5 \text{ MPa} \quad n = 800 \text{ u/min}$$

Daraus folgt:

$$V_H = \frac{60 \cdot P}{B \cdot p \cdot n} = \frac{60 \cdot 500 \text{ W}}{0,15 \cdot 0,5 \text{ MPa} \cdot 800}$$

$$= 500 \text{ cm}^3 = 0,5 \text{ L}$$

Mit dem Kolbendurchmesser von 90 mm,

$$V_H = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot H \rightarrow H = \frac{4 \cdot V_H}{\pi \cdot d^2}$$

$$= \frac{4 \cdot 500 \text{ cm}^3}{3,14 \cdot 9^2 \text{ cm}^2} = 7,98 \text{ cm}$$

$$\approx 80 \text{ mm}$$

Ergebnis: Das Hubvolumen und die Länge von Hub beträgt 0,5 Liter und 80 mm, und diese Lösung wird in der kommenden Zeichnungen gewählt.

Darauf dargestellt sind alle Berechnungen und für unterschiedlichen Berechnungsmethoden verschiedenen Ergebnisse ergibt. Die Vergleichen von unterschiedliche Ergebnisse oder Berechnungsmethode ist notwendig, damit die besten Maße auswählen kann.

Hier wäre eine tabellarische Aufstellung der Ergebnisse der einzelnen Berechnungen Wünschenswert:

Fall	P in W	B	P in Pa	n in u/min	Ergebnis V_H in L
1	500	0,15	$1 \cdot 10^6$	800	0,25
2	500	0,15	$10 \cdot 10^6$	800	0,025
3	500	0,15	$5 \cdot 10^6$	800	0,05
4	500	0,15	$0,5 \cdot 10^6$	800	0,5

Tab.2: Vergleichen der Hubvolumen der einzelnen Berechnungen

Fall	Kolbendurchmesser D in mm	Hub in mm
1	70	65
2	33	29
3	41	38
4	90	80

Tab.3: Vergleichen von Kolbendurchmesser D und Hub bei verschiedenen Fällen

5. Konstruktion des Stirlingmotors

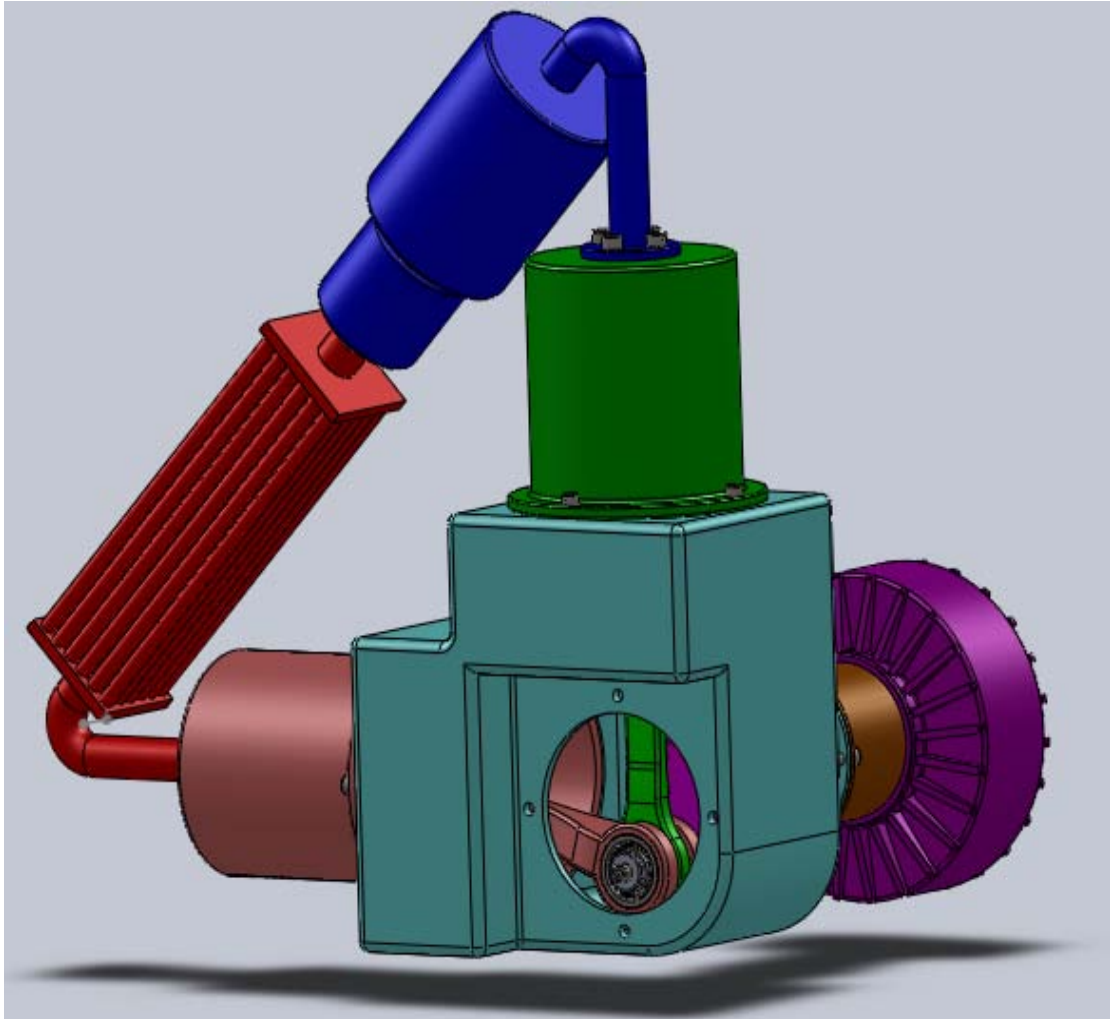


Abb. 5-1: 3D-Modell des Stirlingmotors

Für die Konstruktion des Stirlingmotors, muss man noch mal erklären, dass die Ursache oder was beachtet man zu beachten muss.

Für die Konstruktion des Gehäuses, muss man dazu beachtet, dass der inneren Raum des Gehäuses muss wesentlich oder weitestgehend klein sein. Wegen der Raum innerhalb des Motors ist luftdicht, und alle mit Arbeitsgas vollständig erfüllt, also, je kleiner des Raum innerhalb des Gehäuses, desto

besser ist die Wirkungsgrad des Stirlingmotors.

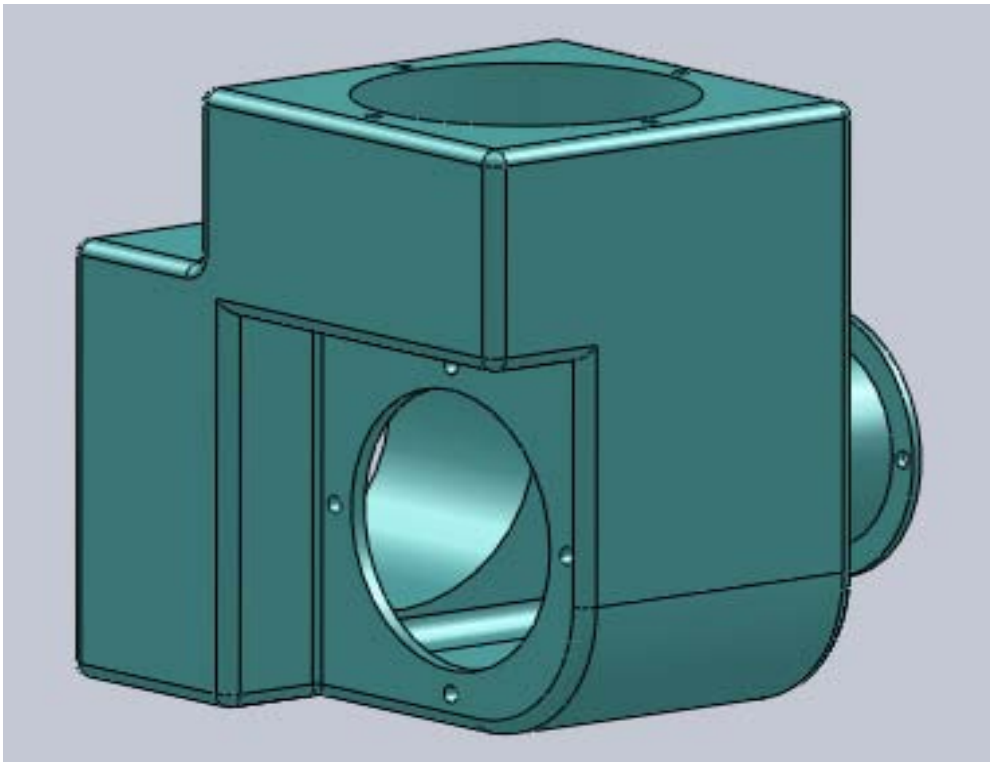


Abb. 5-2: Gehäuse des Stirlingmotors

Konstruktion nach der Berechnungen von Zylindern und Kolben, muss man die deutliche Beziehung genau wissen, dass die inneren Durchmesser von Zylindern oder äußeren Durchmesser von Kolben sind nahezu gleich die Länge von Hub.

Hub und Durchmesser von Zylinder werden unter Fall 4 im Kapitel 4 berechnet, bzw. gewählt.

$$D \text{ oder } d \approx H$$

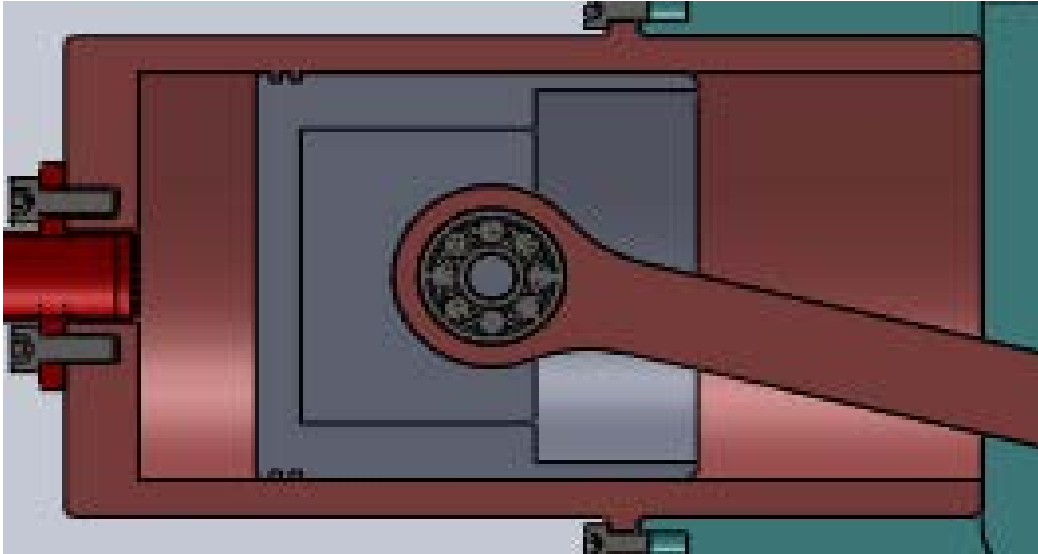


Abb. 5-3: Kolben und Zylinder

Für den Kurbelwelle, habe ich nach folgende dargestellte Zeichnung gemeinsamen konstruiert. Dies mehreren Raum spart und die Festigkeit der Gesamtteile verbessert kann.

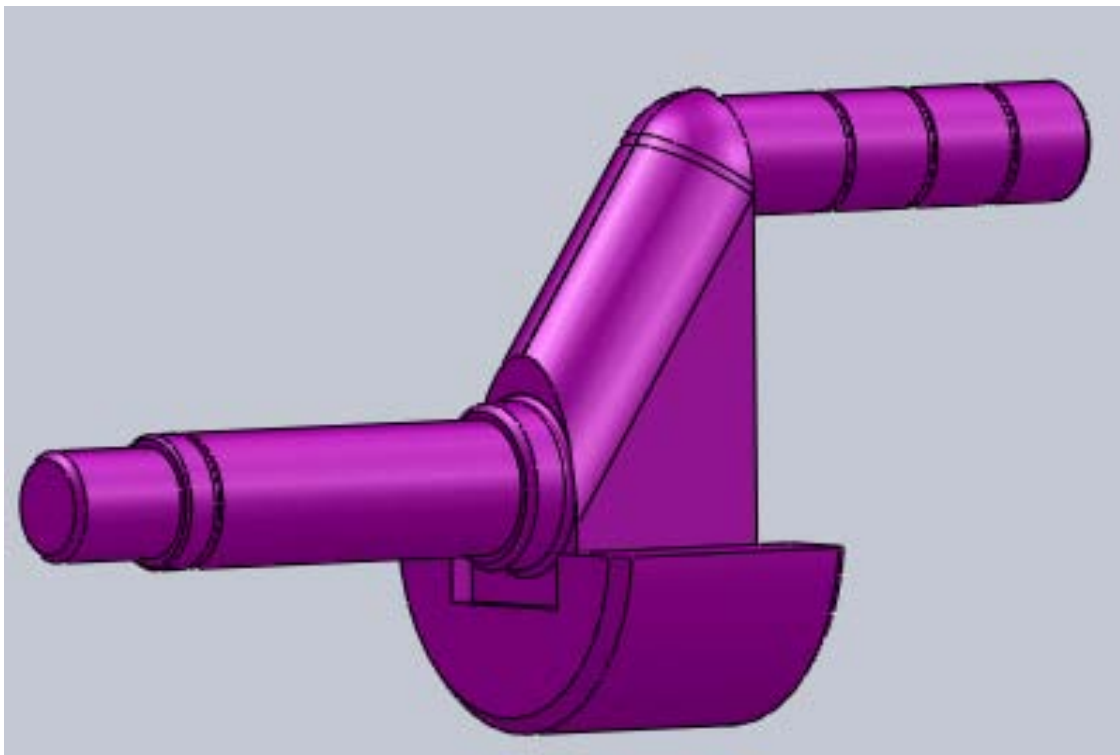


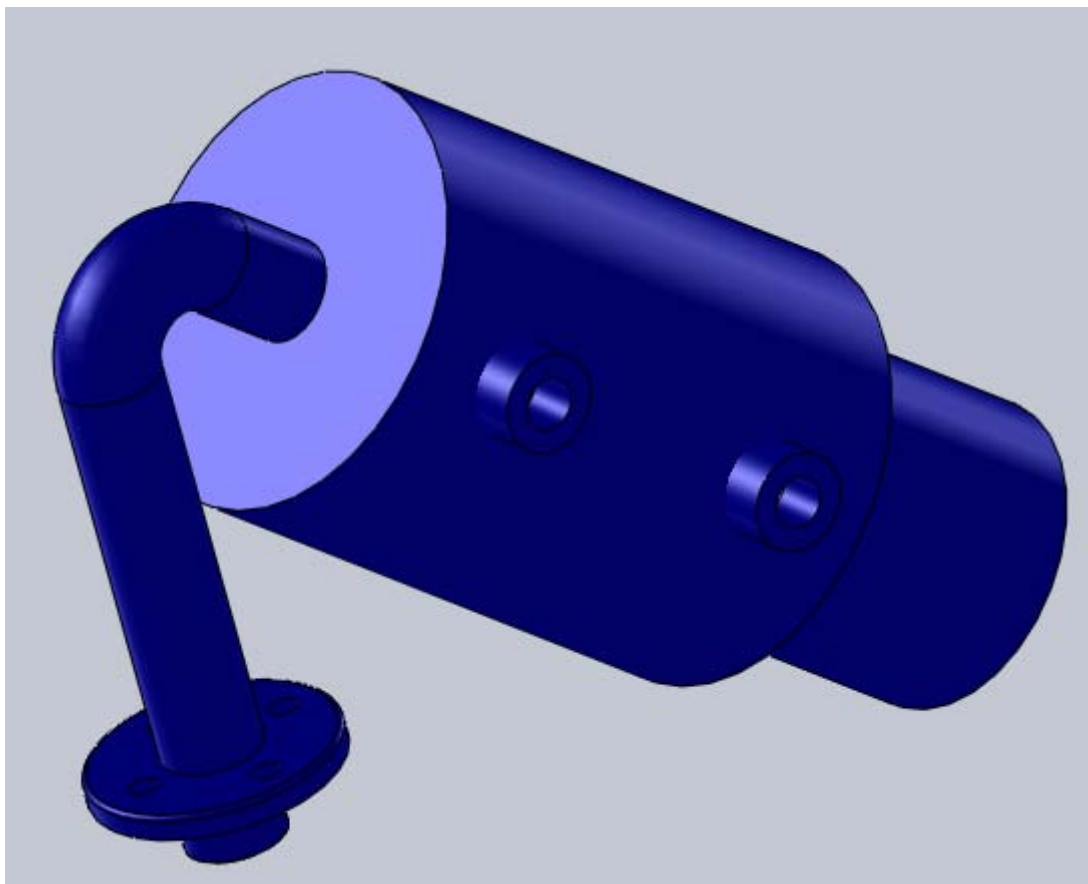
Abb. 5-4: Kurbelwelle

Für die Konstruktion von Kühlung von Erhitzer, brauchst man dazu beachtet

wird, dass die Wärmemenge, die von Erhitzer abgibt oder von der Kühlung aufnimmt wird, muss weitestgehend in Einheitszeit groß sein. d.h. die Geschwindigkeit für Abgabe der Wärme von Erhitzer oder Aufnehmen der Wärme von Kühler muss wesentlich groß sein.

Man brauchst also große Berührungsfläche für den Erhitzer oder die Kühlung! z.b. für die Kühlung des Stirlingmotors, es gibt ganz große Berührungsfläche innerhalb der Kühlung und außerdem mit großer Geschwindigkeit der Kühlmittel (Wasser) fließt, die Kühlung des Stirlingmotors wird also in weitestgehende kurzer Zeit die bestimmten Wärmemenge gekühlt.

Je größer der Berührungsfläche zwischen Arbeitsgas und Kühlmittel und Fließgeschwindigkeit der Kühlmittel, um so größer ist die Wärmemenge, die von der Kühlung des Stirlingmotors aufnimmt wird.



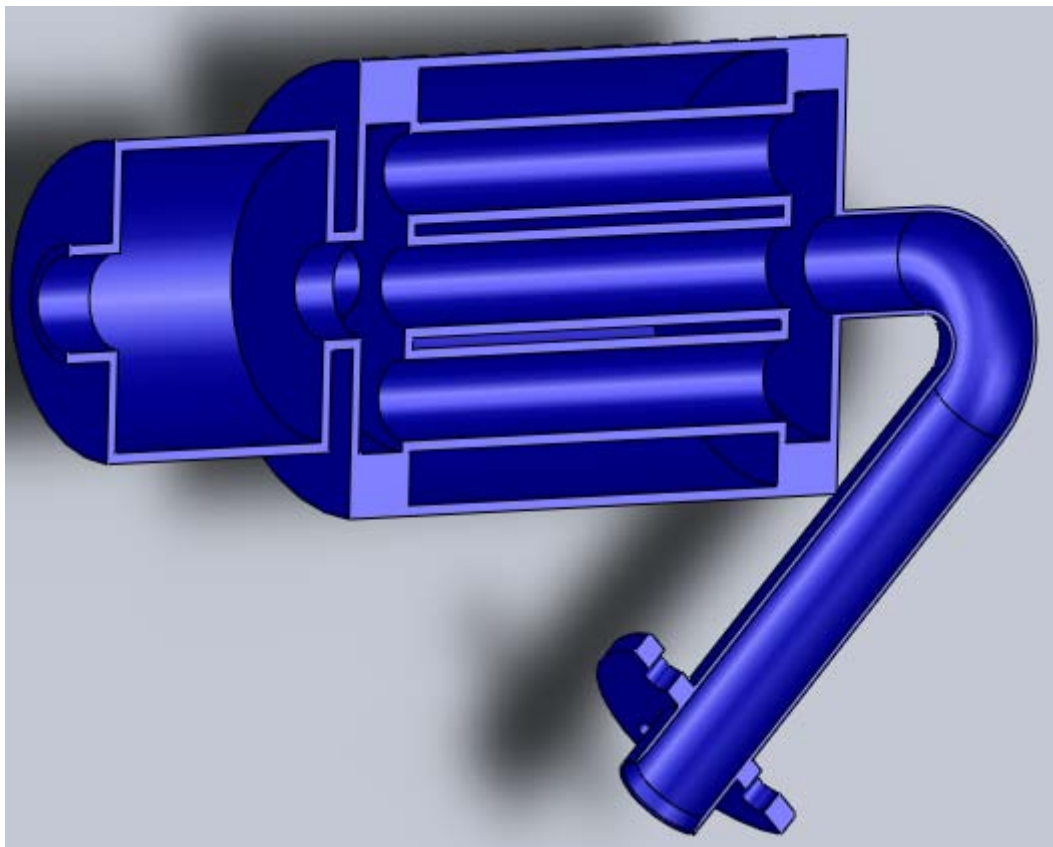
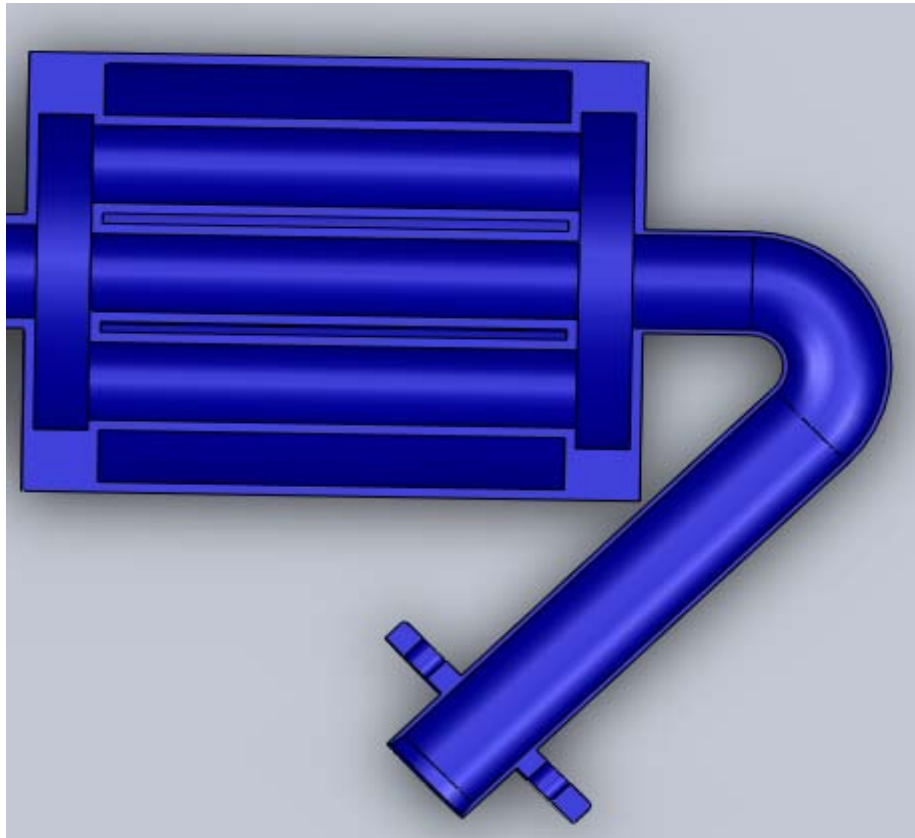
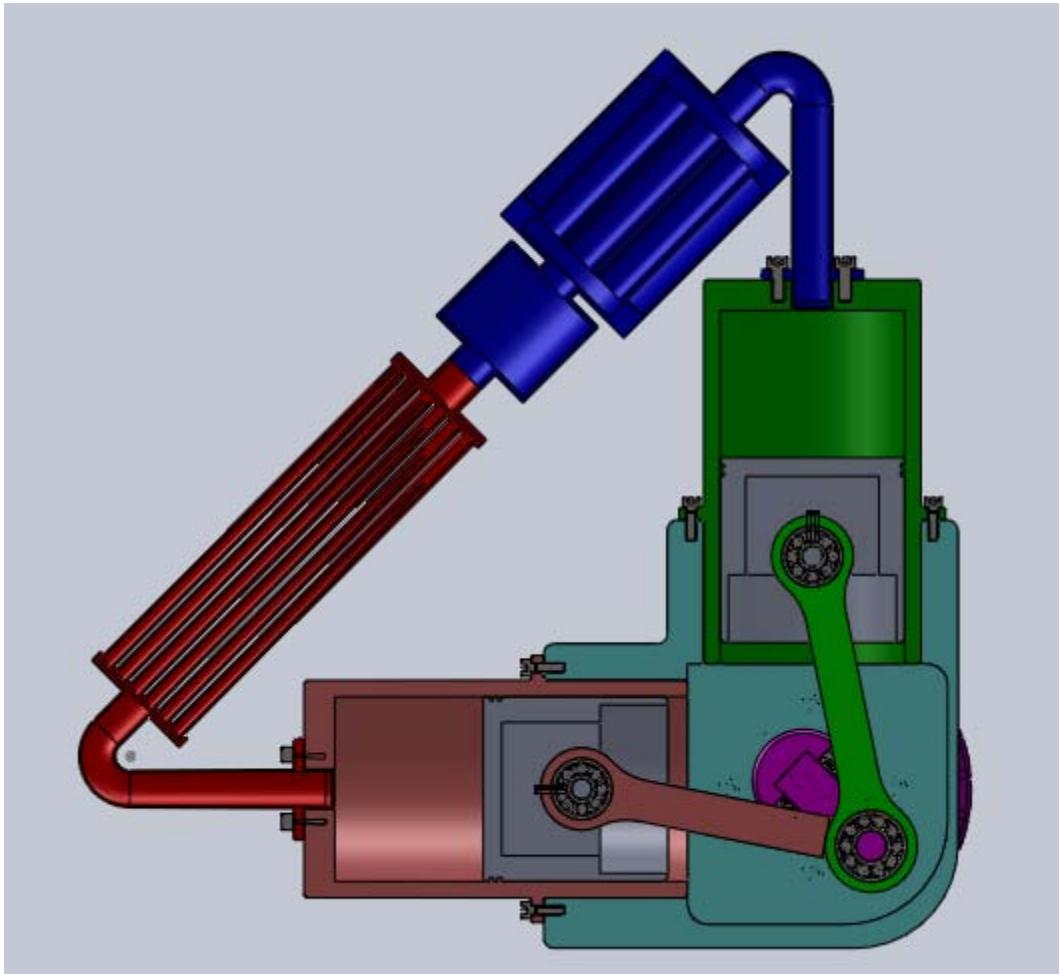
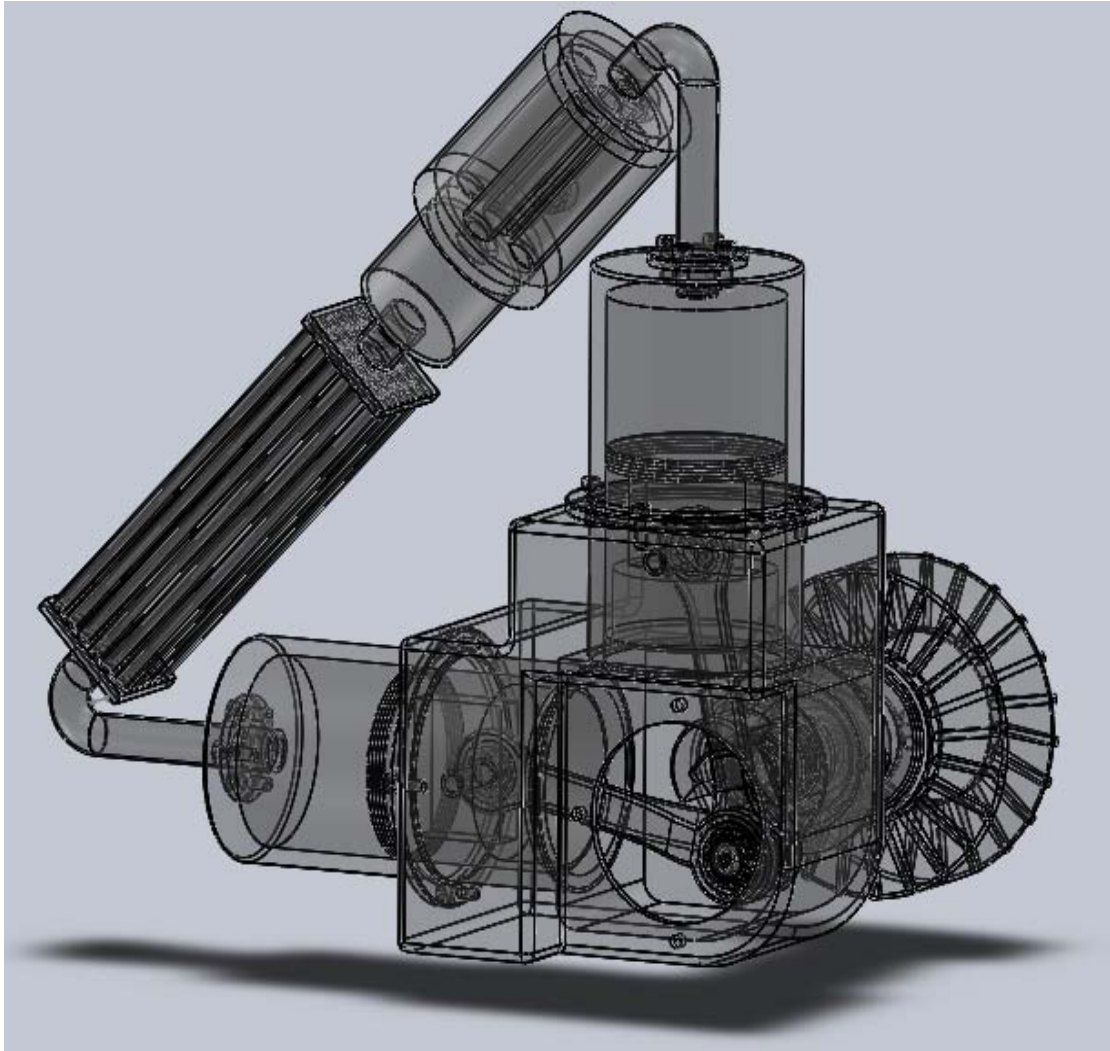


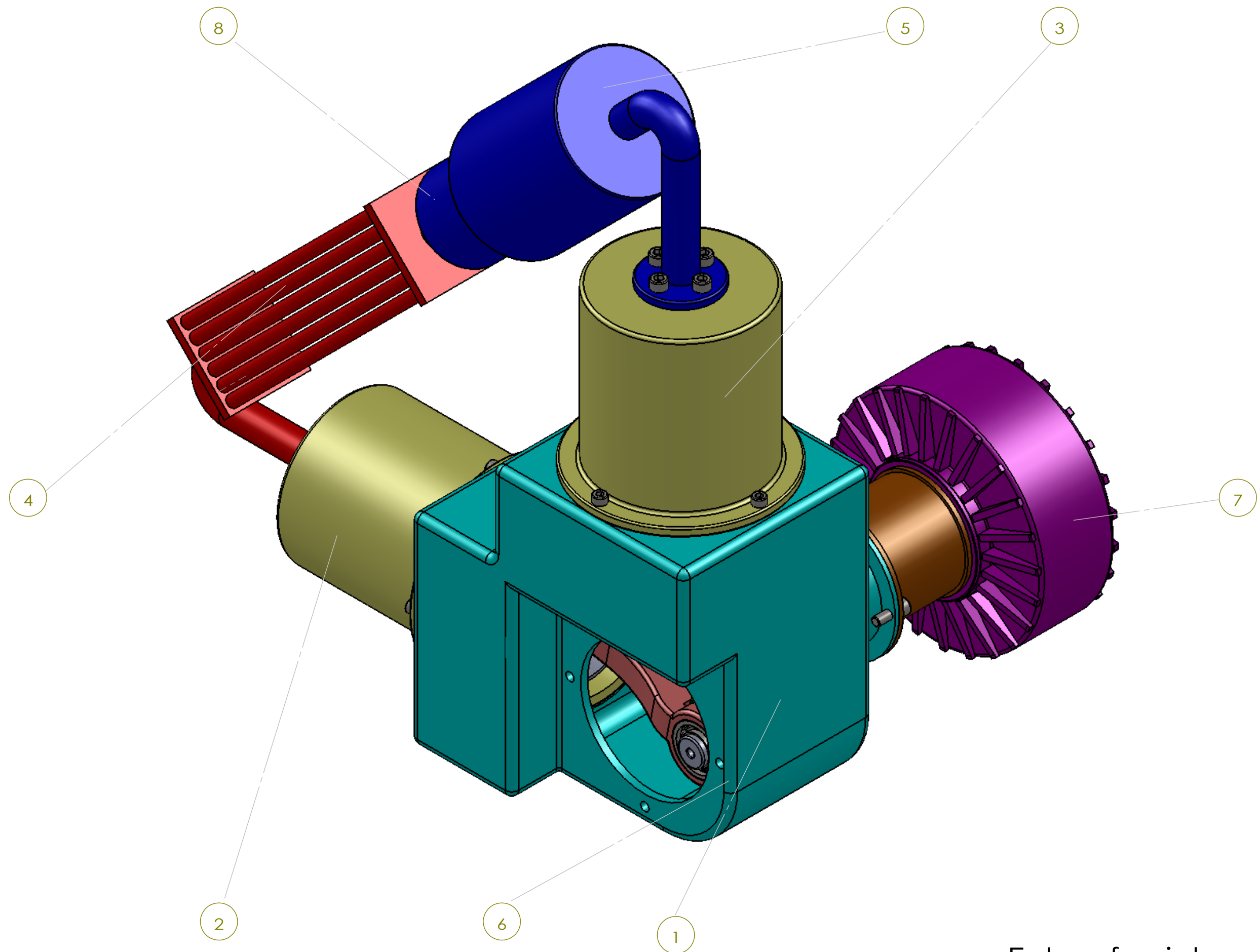
Abb. 5-5: Kühlung des Stirlingmotors

Darunter dargestellt sind die Durchschnittdarstellung und die halbdurchsichtige Darstellung des mit 3D-Software Solidworks gezeichneten Stirlingmotors. Nämlich sind die 3D-Zeichnungen von gefertigten Baugruppe und die Einzelteilen.



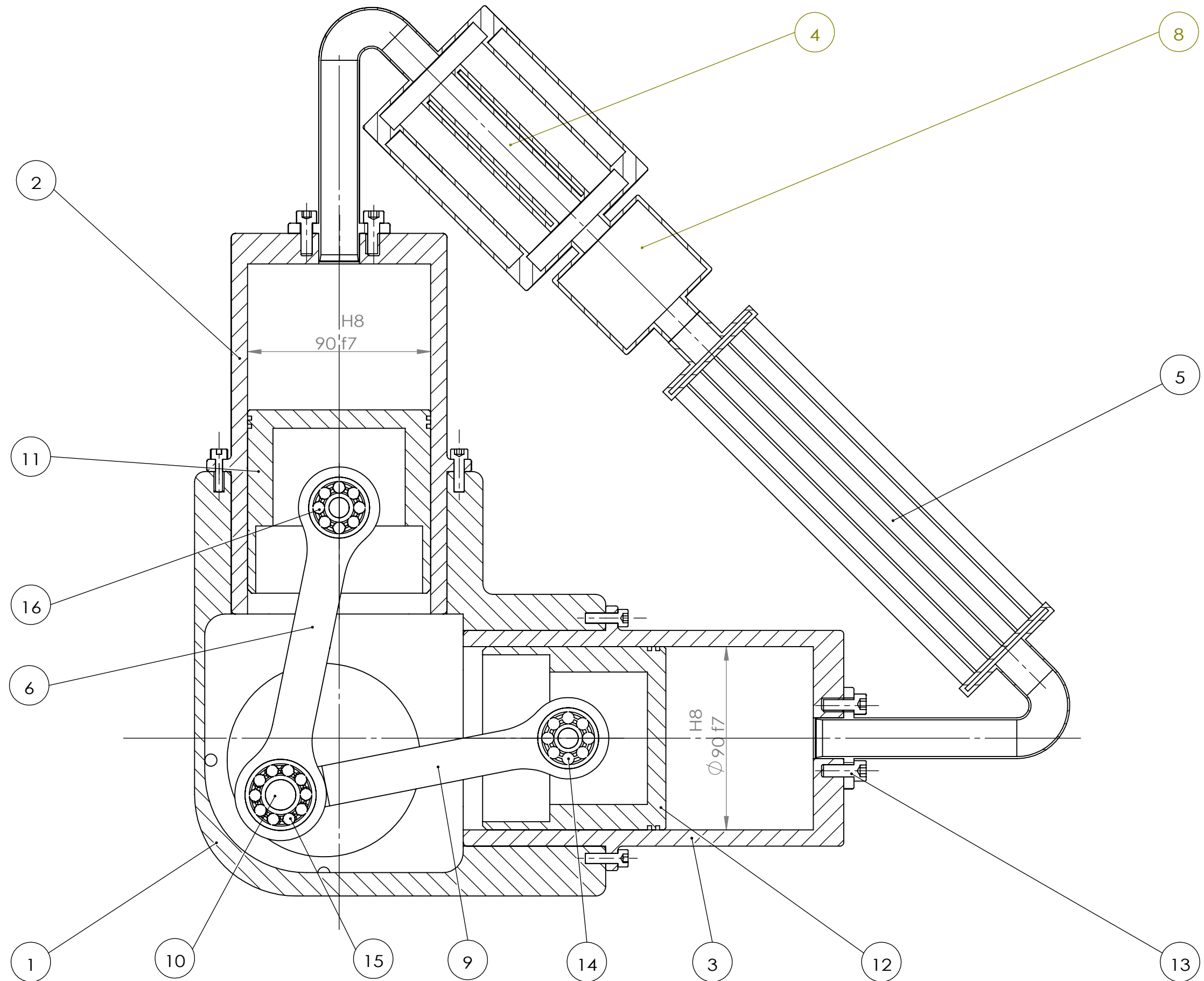


1	2	3	4			5		6
Pos.	Menge	Einheit	Benennung			Sachnummer/ Norm- Kurzbezeichnung		Bemerkung
1	1	Stück	Gehäuse					
2	1	Stück	Expansionszylinder					
3	1	Stück	Kompressionszylinder					
4	1	Stück	Erhitzer					
5	1	Stück	Kühlung					
6	1	Stück	Kolbenstange 1					
7	1	Stück	Generator					
8	1	Stück	Regenerator					
9	1	Stück	Kolbenstange 2					
10	1	Stück	Kurbelwelle					
11	1	Stück	Verdrängerskolben					
12	1	Stück	Arbeitskolben					
13	2	Stück	Innenseckskanteschraube			DIN 912 M10 × 16 × 8.8		
14	1	Stück	Rillenkugellager			DIN 625 – 6200		
15	1	Stück	Rillenkugellager			DIN 625 – 6203		
16	1	Stück	Rillenkugellager			DIN 625 – 6202		
17	1	Stück	Distanzring			10 × 14 × 5		Kupfer
18	1	Stück	Rillenkugellager			DIN 625 – 6203		
19	1	Stück	Kupplung					
20	1	Stück	Scheibe			5 × 19 × 4		Sonderanfertigung
21	1	Stück	Innenseckskanteschraube			DIN 912 M6 × 16 × 8.8		
22	1	Stück	Schwungrad					
23	1	Stück	Sicherungsring			DIN 472 – 17 × 1		
24	1	Stück	Sicherungsring			DIN 472 – 15 × 1		
25	1	Stück	Wellen					
26	1	Stück	Distanzhülse			17 × 21 × 20		Sonderanfertigung
					Datum	Name	(Benennung) <div>Stirlingmotor</div>	
				Bearb.	27.06.11	Xiaohu, Wang		
				Gepr.				
				Norm				
							(Zeichnungsnummer) <div>MB07w1 - B</div>	
							Blatt 1	
							Bl.	
Zust.	Änderung	Datum	Name	(Ursprung)	(Ersatz) für		(Ersatz) durch	



Entwurfszeichnung 1

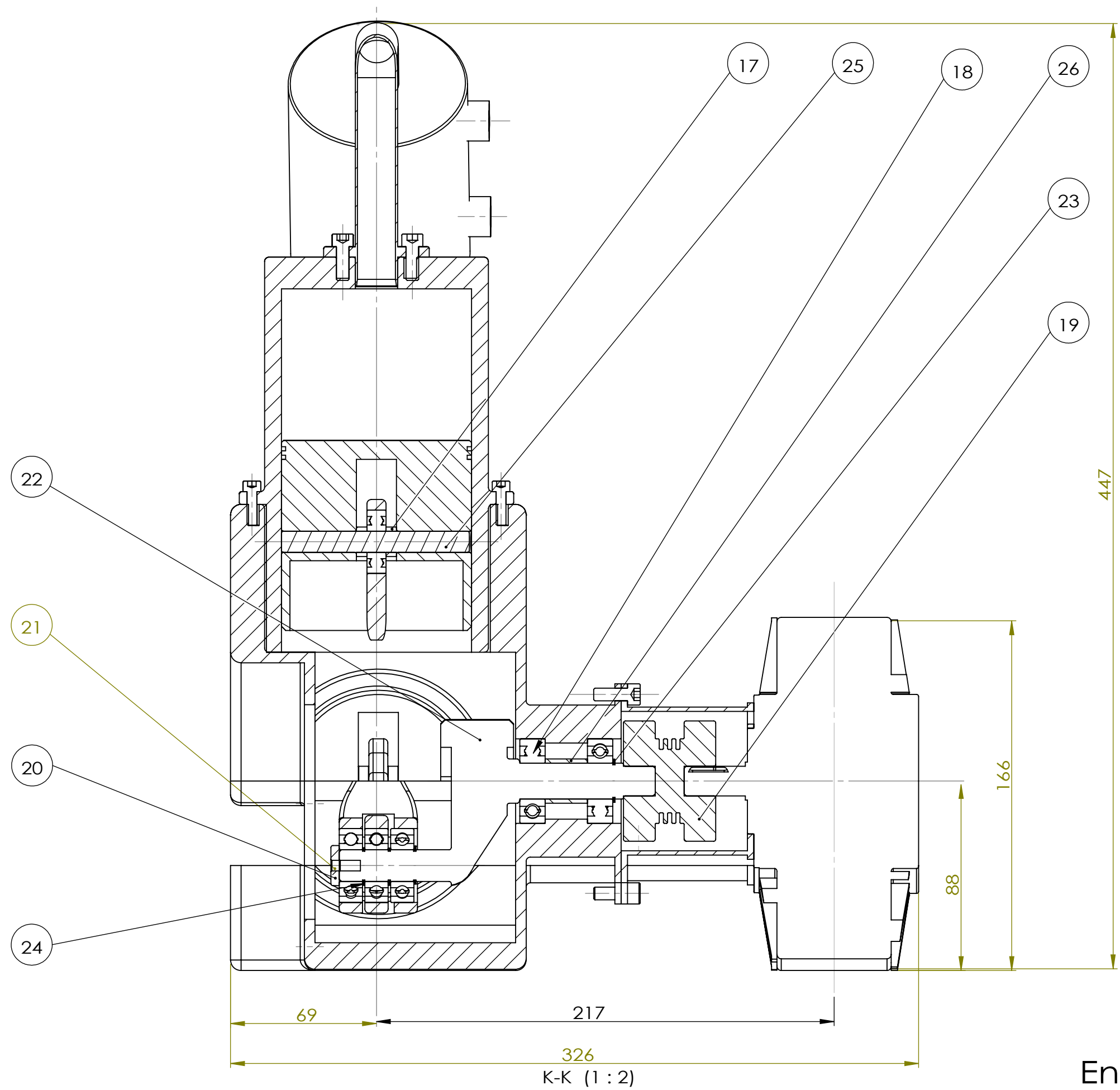
Maßstab 1:2



B-B (1 : 2)

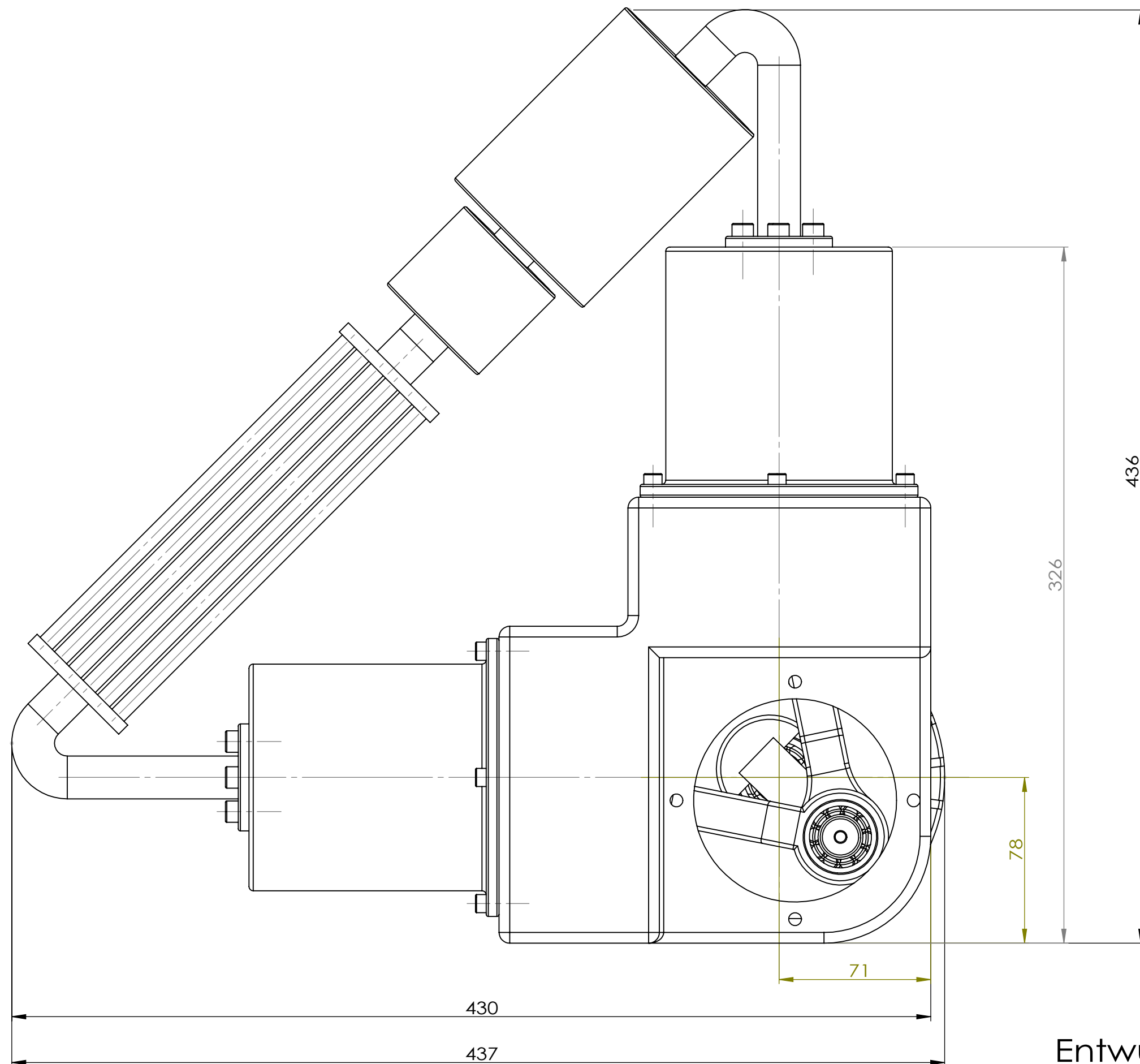
Entwurfszeichnung 2 A3

Masstabe 1:2



Entwurfszeichnung 3

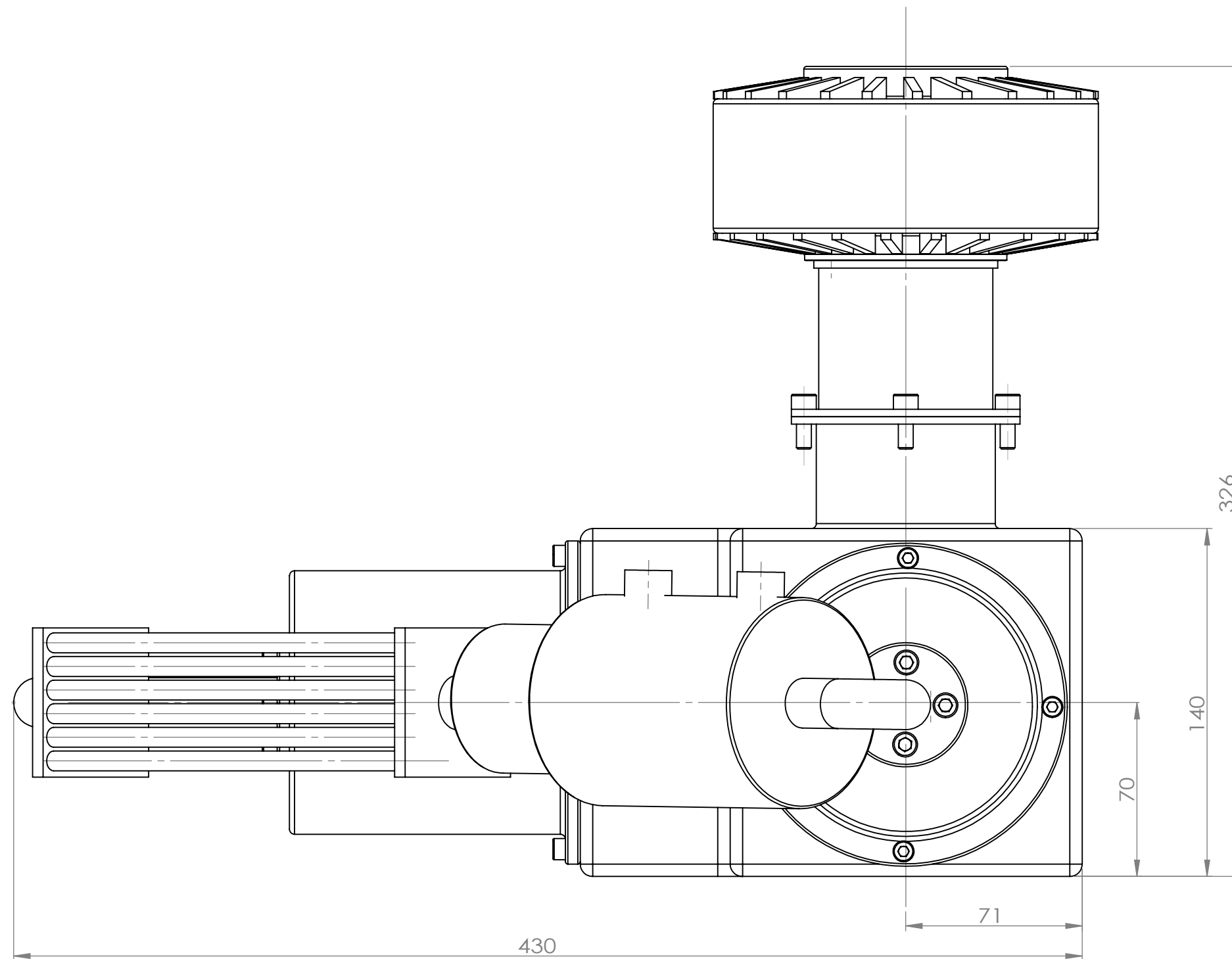
Maßstab 1:2



Entwurfszeichnung 4

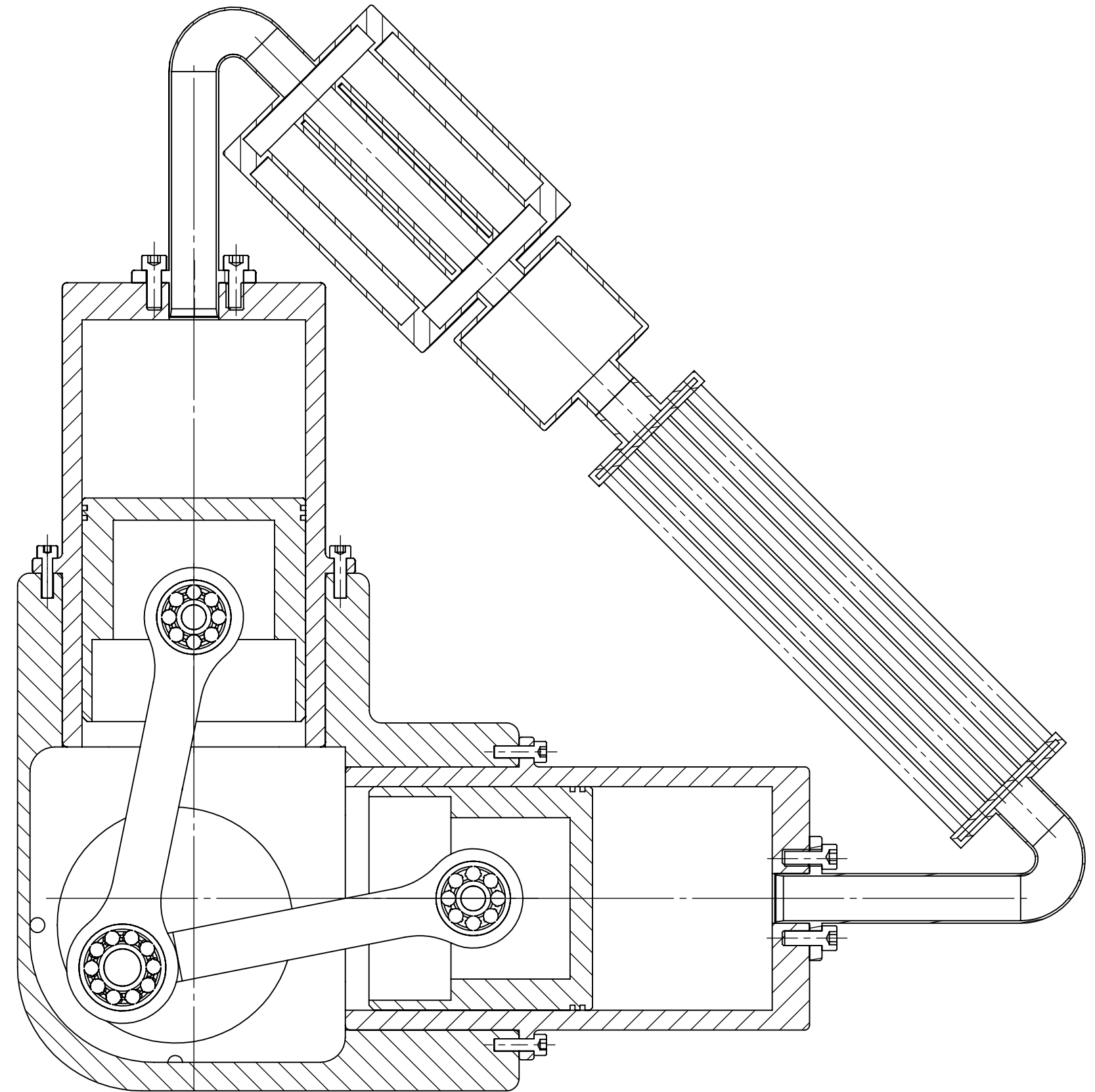
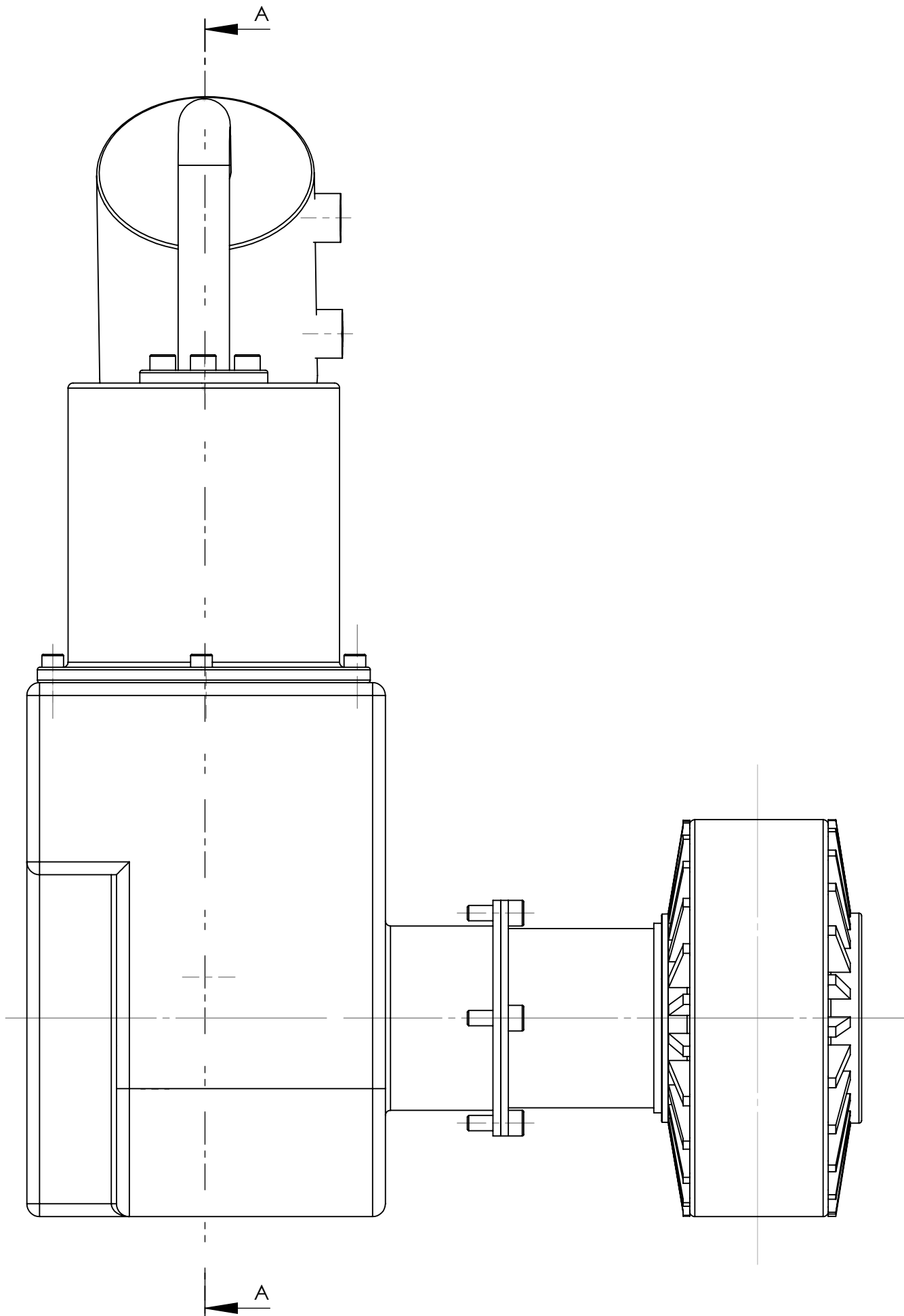
Massstab 1:2

A3

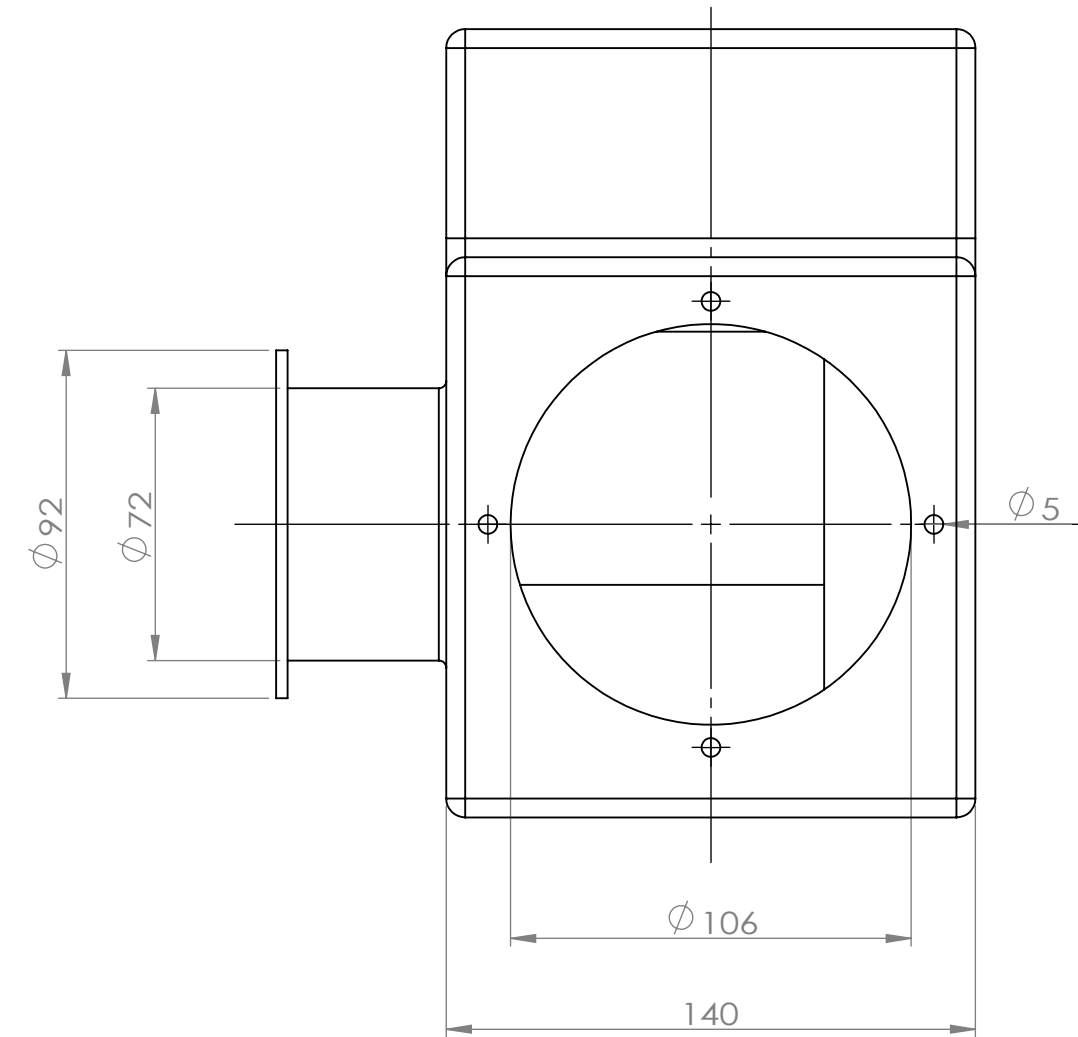
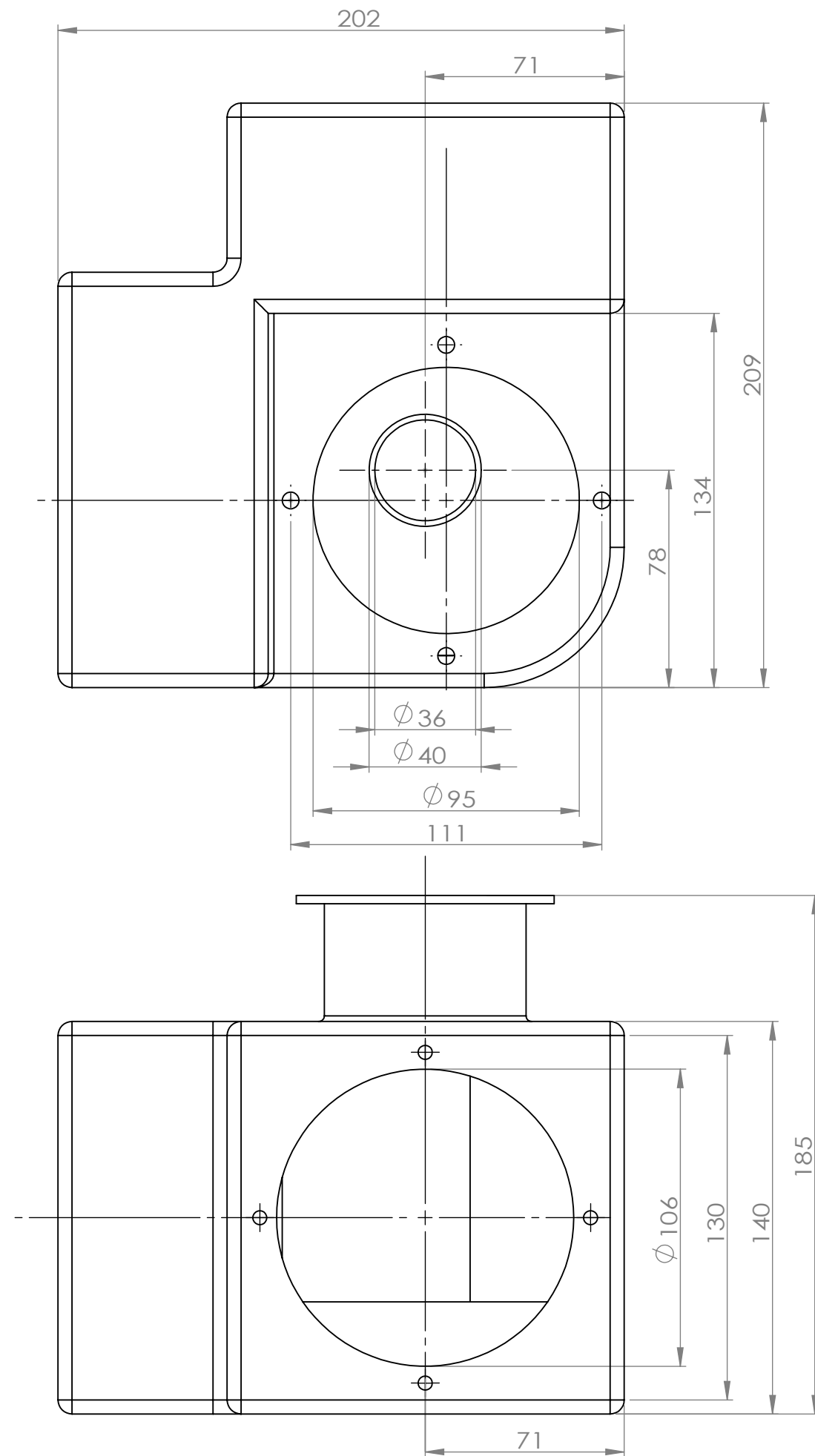


Entwurfszeichnung 5 A3

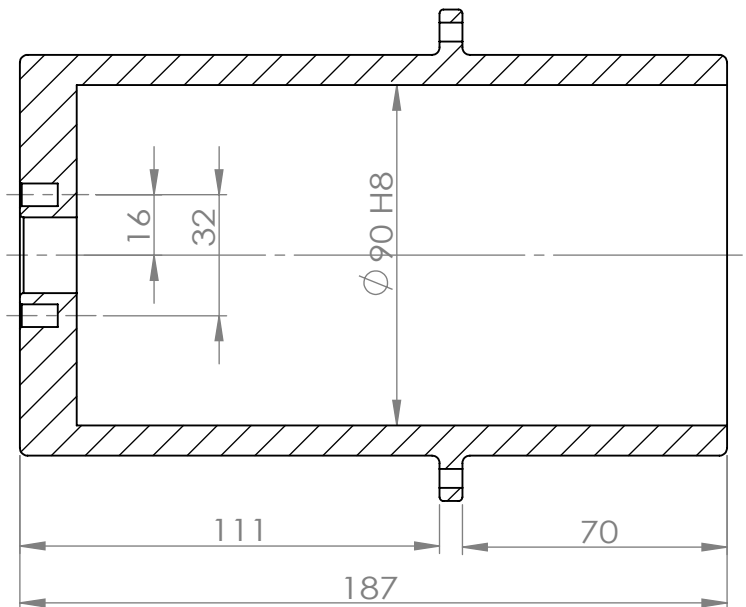
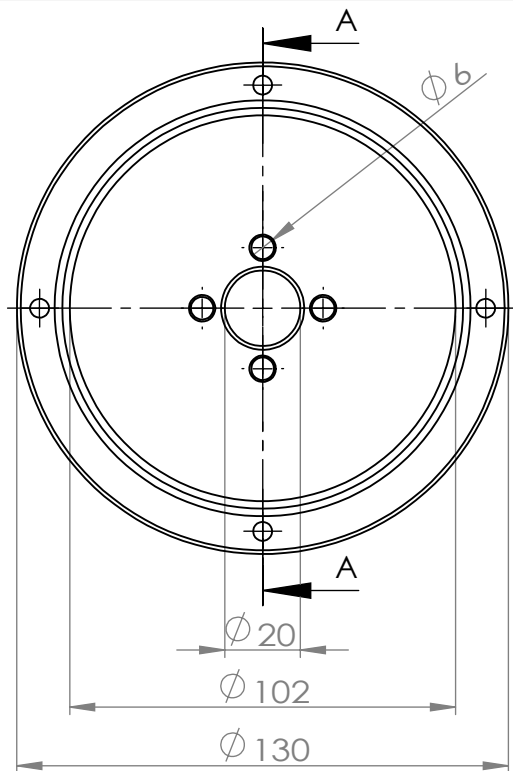
Massstabe:1:2



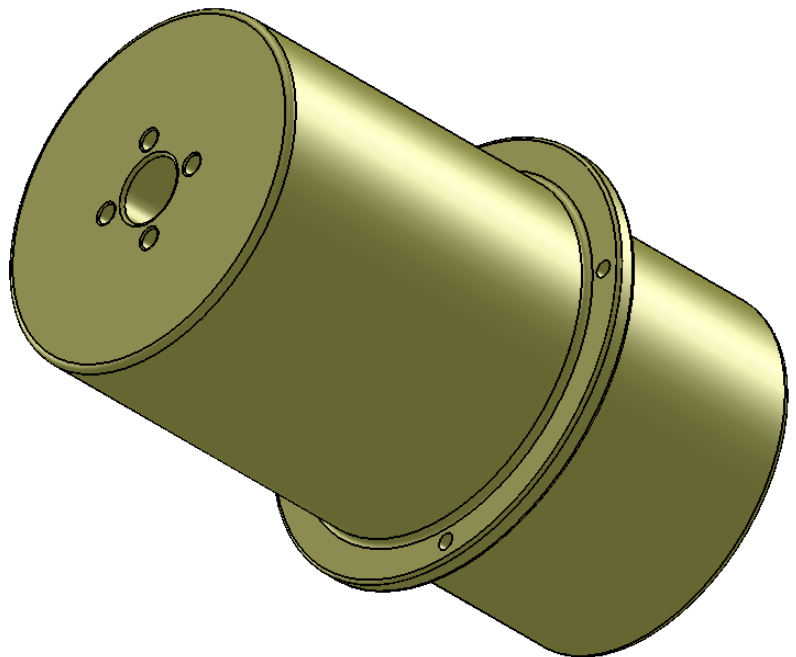
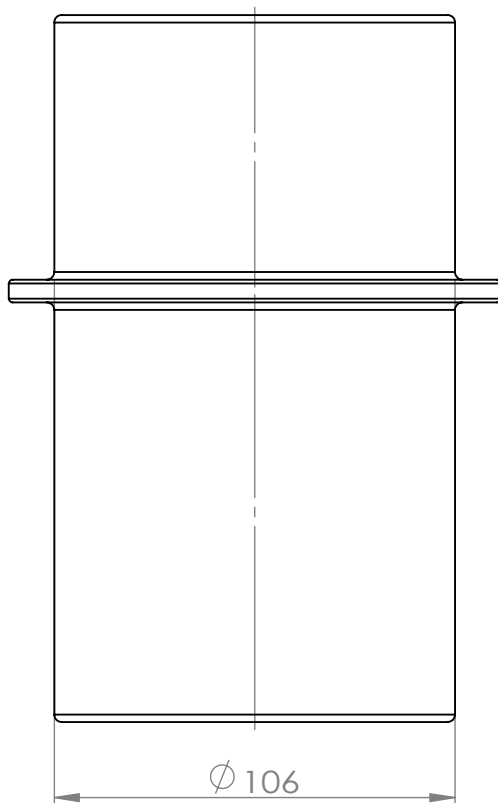
A-A (1 : 2)



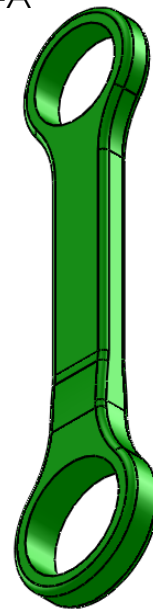
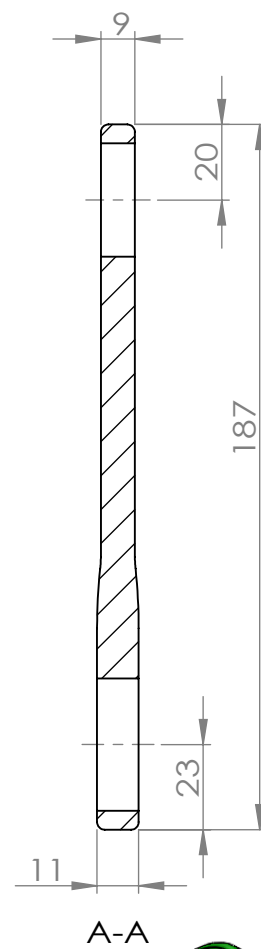
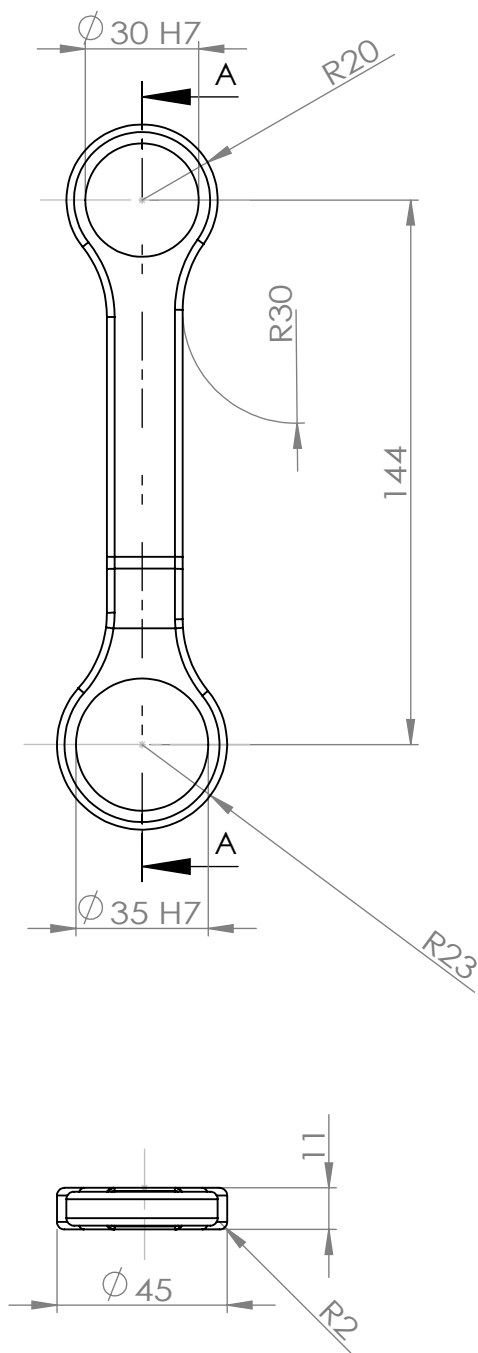
Maschinenbau		(Zul.Abw.) ISO 2768-m		(Oberfl.)		Maßstab 1:2	
				Datum	Name	Gehäuse	
				Bearb.	Xiaohu		
				Hochschule Mittweida		2011-01.000	
						A3	



A-A (1 : 2)



Maschinenbau		(Zul.Abw.)		Maßstab 1:2	
		ISO 2768-m			
			Datum	Name	Zylinder
			Bearb.	Xiaohu	
					2011-01.000
					A4



Maschinenbau

(Zul.Abw.)

ISO 2768-m

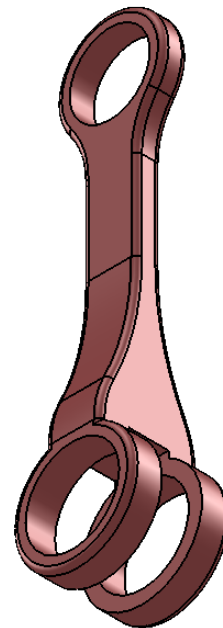
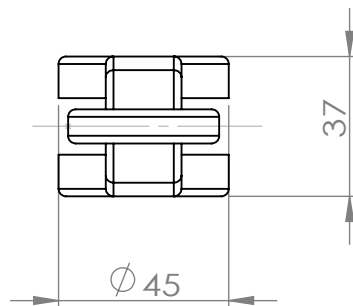
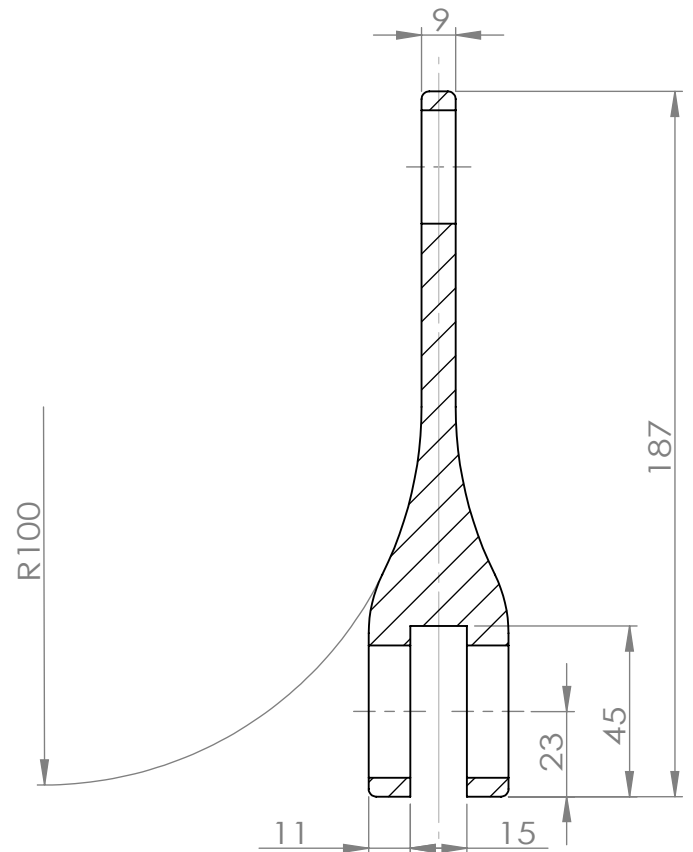
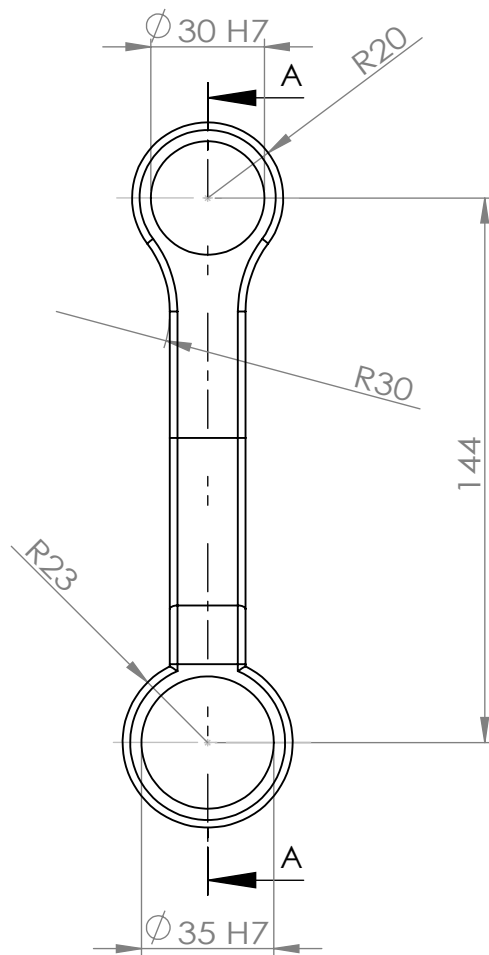
Maßstabe 1:1

Bearb.	Datum	Name
	27.06.11	Xiaohu

Kolbenstange 1

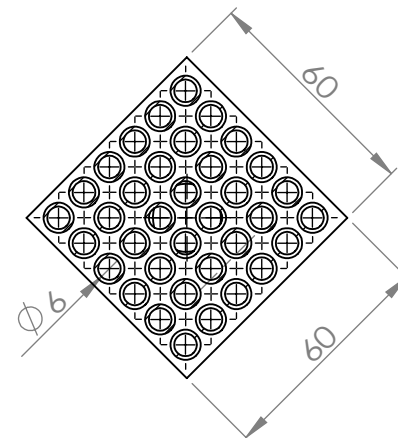
2011.01.000

A4



Maschinenbau		(Zul.Abw.)		Maßstab 1:1	
		ISO 2768-m			
			Datum	Name	Kolbenstange 2
		Bearb.	27.06.11	Xiaohu	
2011- 01.000					A4

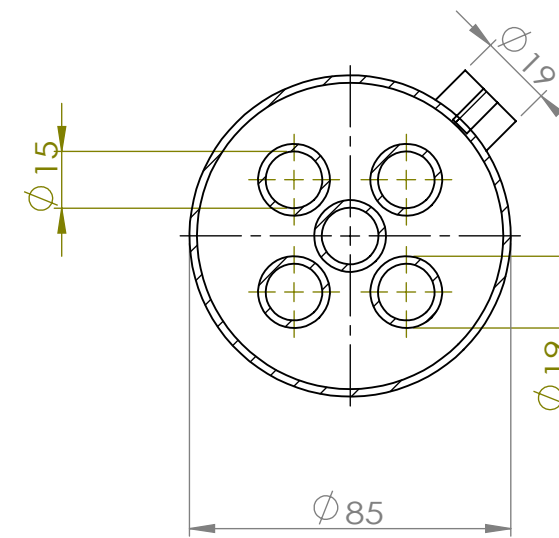
Maschinenbau		(Zul.Abw.)				Maßstab 1:2			
		ISO 2768-m							
					Datum	Name			
				Bearb.	27.06.11	Xiaohu			
						Kurbelwelle			
						2011-01.000			A4



Technical drawing of a mechanical part, showing a perspective view and a cross-section A-A.

The perspective view shows a cylindrical body with a flange at one end and a semi-circular top at the other. The cross-section A-A shows a circular profile with a diameter of 20, a flange thickness of 5, and a total height of 14. The semi-circular top has a radius of R6.

Maschinenbau				(Zul.Abw.)						Maßstab 1:2					
				ISO 2768-m											
						Datum	Name		Erhitzer						
					Bearb.	27.06.11	Xiaohu								
										2011-01.000				A3	



Maschinenbau		(Zul.Abw.)		ISO 2768-m				Maßstab 1:2				
						Datum	Name	Kühlung				
					Bearb.	27.06.11	Xiaohu					
								2011-01.000				A3

Kabel (Cable)

Top View: Shows a circular reel with 16 spokes. Dimensions include an outer diameter of $\varnothing 155$, an inner diameter of TK $\varnothing 60$, and a width of 85. A cable is shown attached to the top. A detail callout 'A'-A' points to the spoke attachment.

Side View: Shows the reel's profile with a total height of 172,50 and a central width of 40. It features 8 rectangular slots. Dimensions for the slots include a width of 20, a depth of 2,50, and a distance of 30 between the centerlines of adjacent slots. The total width of the reel body is 112,10.

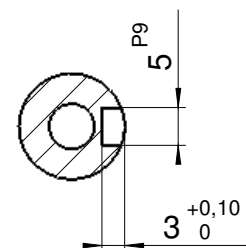
Detail 'A'-A': A cross-section of a spoke showing a hole with a diameter of $\varnothing 14_{k6}$ and a depth of 5. The hole is located at a distance of 3 from the outer edge, with a tolerance of $+0,10 / 0$.

Technical Specifications:

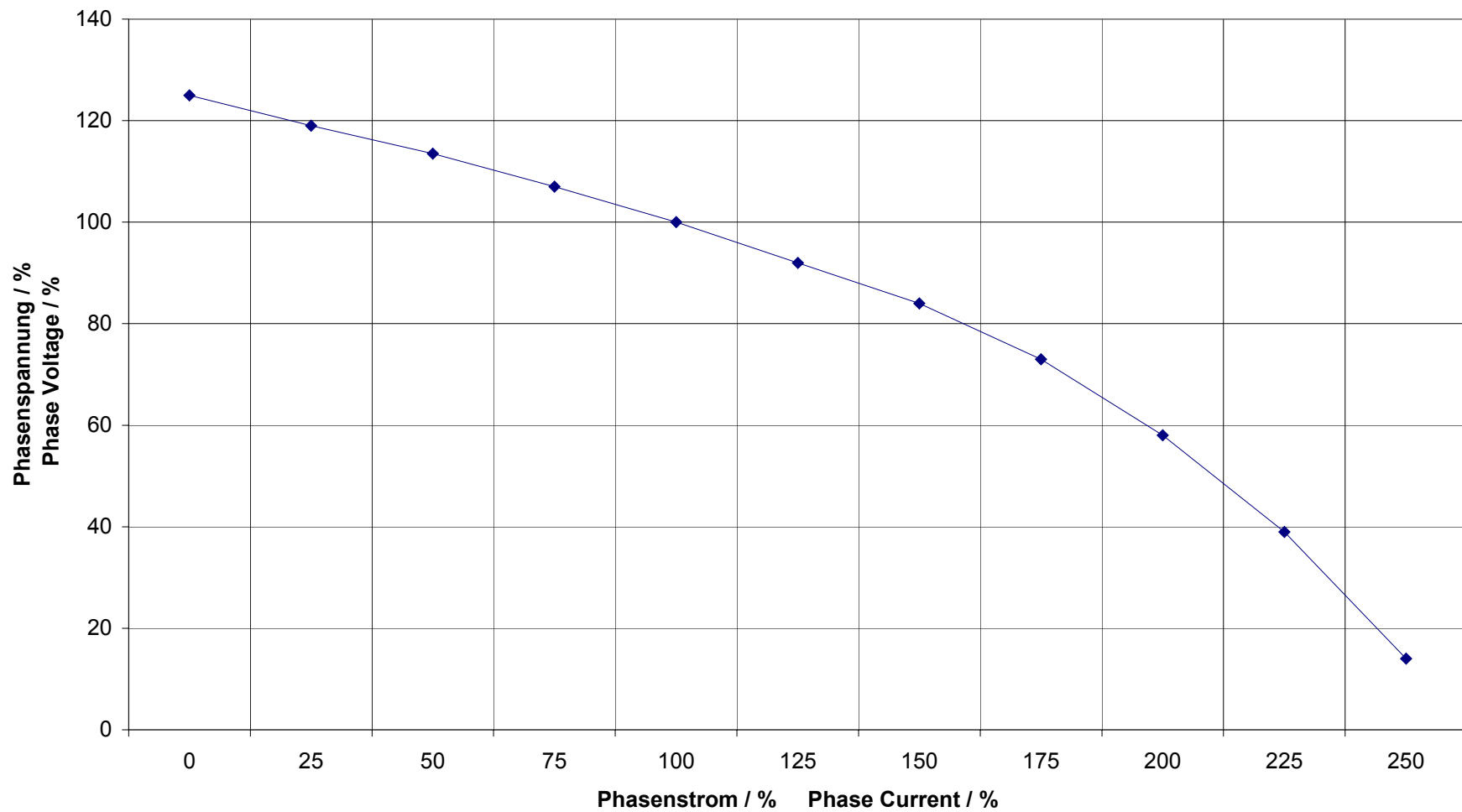
- Toleranz ISO 2768m
- Gewicht/weight: kg
- Werkstoff/material:
- Zeichng-Nr./drawing-number: PGS080.000.L.B.
- Massstab/scale: 1:1

Pos.	Gegenstand:	Datum:	gez:	Datum:	Name:
			gez:	22.05.2007	Hanrath

Maurer Elektromaschinen
www.maurelma.ch

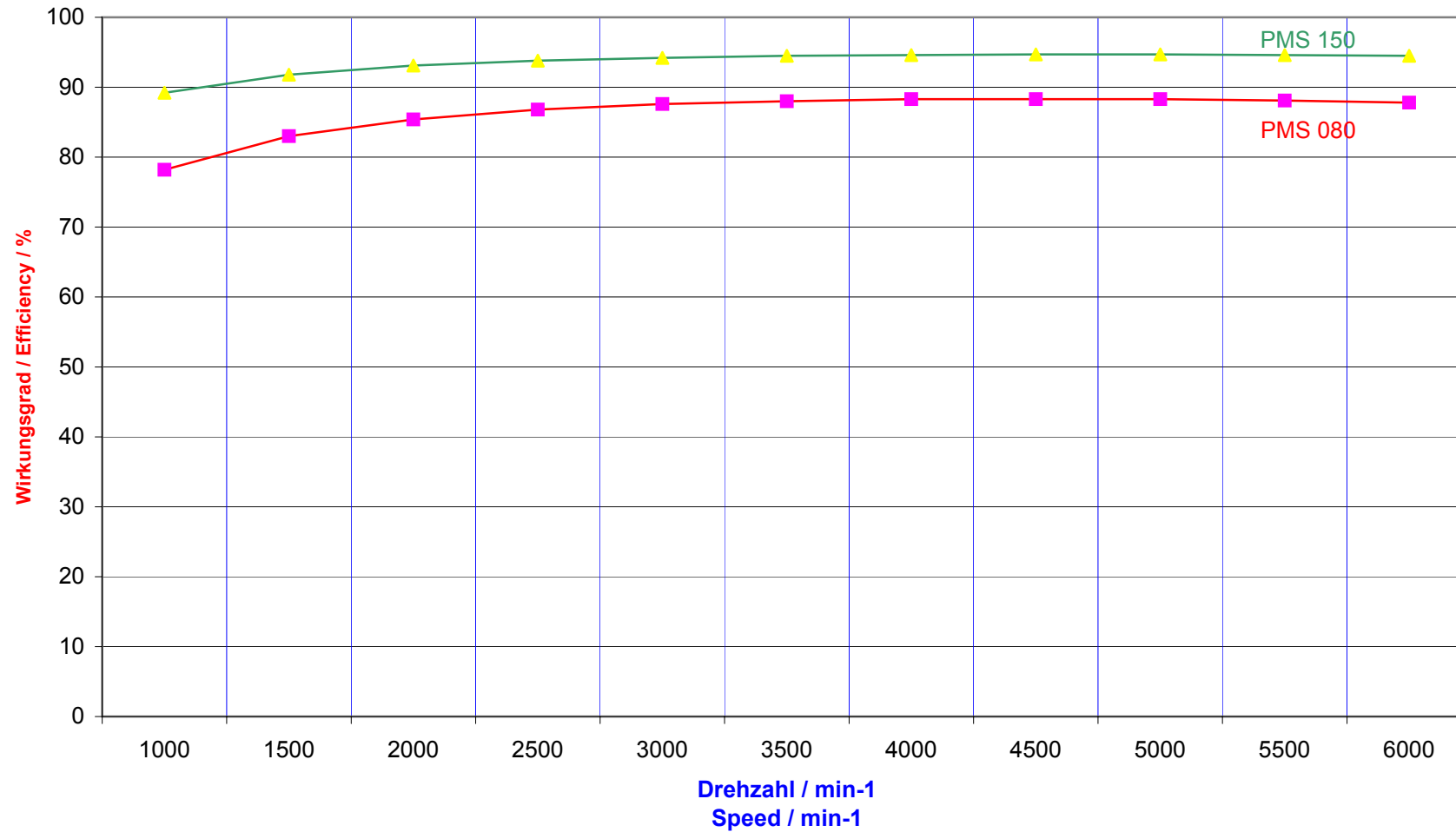
[illegible]

Synchron-Scheibengenerator, Typ PGS, allgemeine Spannungscharakteristik
Synchronous Disk Generator, Type PGS, General Voltage Characteristic



Maurer
Elektromaschinen
www.maurelma.ch

Synchron-Scheibenläufer, Reihe PMS Wirkungsgrad als Funktion der Drehzahl
Synchronous disk motor, sequence PMS Efficiency as a function of speed



6. Zusammenfassung und Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden die bisher gewonnenen Ergebnisse zusammengefasst. Zusätzlich wird ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen gegeben.

6.1 Zusammenfassung

Ergab sich das Bachelorarbeitsthema "Konstruktion eines Funktionsmodells eines Heißgasmotors nach den Stirling-Prinzip mit Arbeits- und Verdrängerkolben in V-Anordnung und elektrischer Auskoppelung der erzeugten Leistung" aus einer Anforderung der Prof. Reglich von der FH Mittweida.

Nach der Findung des Bachelorarbeitsthemas wurden die Grundlagen der Stirlingstechnologie und Ihre Standards erläutert. Dieses Elementarwissen soll der gesamten Arbeit als Grundlage dienen, z.b. die Grundlagen der Wärmelehre und Funktionsweise des Stirlingmotors. Anschließend wurde für das Aufgabenverständnis des Stirlingmotors mit seinen Funktion erklärt.

Hinterher wird die Entwurfsberechnungen zur thermischen Auslegung des Stirlingmotors für eine Leistung von 500 Watt vorgestellt. Dazu wurde die Entwurfsberechnungen mit unterschiedlichen Wege gemacht und Vergleichen von verschiedenen Ergebnisse berücksichtigt, danach die besten Fall ausgewählt. Daraus folgt die Bemassungen von allen Hauptteilen des konstruierenden Stirlingmotors bestimmt wurde.

Schließlich wurden im Kapitel 5 die 3D-Zeichnungen mit 3D-Software

Solidworks erfolgt, nämlich noch die passende Einrichtungen des Stirlingmotors z.B. Erhitzer, Kühlung, Kupplung oder Regenerator bestimmt wurden.

6.2 Ausblick

Stirlingmotoren sind externen Verbrennungsmotoren, die das traditionelle Problem vermeiden, dass die Explosionsgefahr im Zylinder, um einen hohen Wirkungsgrad, geringes Rauschen, geringe Umweltbelastung und niedrige Betriebskosten zu erreichen. Der Stirlingmotor kann brennen eine Vielzahl von brennbaren Gasen, wie zum Beispiel: Erdgas, Biogas, Flüssiggas, Wasserstoff, usw., kann auch brennen Diesel, Flüssiggas und anderen flüssige Brennstoffe, sondern auch die Verbrennung von Holz und die Nutzung der Sonnenenergie. Je Senken Sie die Raumtemperatur, umso höher ist die Effizienz der Stromerzeugung. Der Stirlingmotor hat die größte Vorteil, dass die Höhenlage über dem Meeresspiegel beeinflusst nicht. Das heißt, der Stirlingmotor ist sehr gut geeignet für Höhen Regionen.

Mit der ernster globale Energie- und Umweltsituationen, Stirlingmotoren sind mehr und mehr beachtet, wegen die Vielzahl von Energieträgern als bereite Anpassungsfähigkeit und hervorragende Umwelteigenschaften des Stirlingmotors. Deshalb ergab sich schon viele Forschungen im Bereich Wasser-, Solar-, Kraftwerk-, Wärmepumpe-Energie, und wurden eine Reihe von erfolgreichen Anwendungen.

Mehrere Eigenschaften des Stirlingmotors sind auch sehr gut für U-Boote geeignet. Zunächst ist das Brennen mit keinen Explosionen und geringe Rauschen, aufeinanderfolgt; Zweitens sind die Benutzbarkeit von allen Brennstoffe, und der Brennkammer sind außerhalb des Stirlingmotors. Man

kann auch so sprich, dass der Stirlingmotor arbeitet, solange der Stirlingmotor die Kühlung und Erhitze liefert wird.

Doch der Stirlingmotor gibt es noch viele Probleme zu lösen müssen, z.B. die hohen Kosten von Expansionsraum, Verdichtungsraum, Erhitze, Kühlung, und Regenerator usw. Und die Wärmeverluste des Stirlingmotors sind Zwei- bis Dreifache größer als den Verbrennungsmotoren. So, die Verwendungen von Stirlingmotors zurzeit noch nicht umfassend.

Literaturverzeichnis

[Sexl / Raab / Sexl / Raab / Streeruwitz (1990) Physik 2
Streeruwitz]

[Wikipedia 2011] AEE – Stirlingmotor: 2. Der Prozess URL:
<http://www.aee.at/verz/artikel/stirl01.html> , verfügbar am 05.
05. 2011

[Wikipedia 2011] Wikipedia – Stirlingmotor
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor> verfügbar
am 05. 05. 2011

[Wikipedia 2011] Wikipedia Stirlingmotor, Alpha-Konfiguration URL:
[http://de.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor#Stirlingmotor.2C_](http://de.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor#Stirlingmotor.2C_Alpha-Konfiguration)
[Alpha-Konfiguration](http://de.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor#Stirlingmotor.2C_Alpha-Konfiguration) verfügbar am 08.05.2011

[Müller 2011] Alexander Müller, Philipp Splettstößer und Jörg Fandrich. Der
Stirlingmotor
URL: [http://www.physik.fu-berlin.de/schulkontakte/physlab/la](http://www.physik.fu-berlin.de/schulkontakte/physlab/labbor/img/Stirlingmotor1.pdf)
[bor/img/Stirlingmotor1.pdf](http://www.physik.fu-berlin.de/schulkontakte/physlab/labbor/img/Stirlingmotor1.pdf) verfügbar am 05.05.2011

[München 2011] München Basisinfo Stirlingmotoren URL:
[http://www.onlinejournalismus.org/programme/muc/plan/stirli](http://www.onlinejournalismus.org/programme/muc/plan/stirlingmotor.pdf)
[ngmotor.pdf](http://www.onlinejournalismus.org/programme/muc/plan/stirlingmotor.pdf)
Verfügbar am 10.05.2011

[Werdich/Kübler 2003] Stirling-Maschinen Grundlagen·Technik·Anwendungen
Martin Werdich / Kuno Kübler 10. Auflage 2003

[Viebach 1998] Der Stirlingmotor einfach erklärt und leicht gebaut Dieter
Viebach -1. Auflage –Staufen bei Freiburg : ökobuch, 1998

[Muhs/Wittel/ Roloff/Matek Maschinenelemente Normung Berechnung
Jannasch/Voßiek 2007] Gestaltung –Dieter Muhs/Herbert Wittel/Dieter
Jannasch/Joachim Voßiek – 18. Auflage 2007

[FAG 1999] FAG Wälzlager - Kugellager·Rollenlager·Gehäuse·Zubehör
FAG Kugelfischer Georg Schäfer AG Ausgabe 1999

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur in der Hilfe von Prof. Reglich und unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift